



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 105640552 B

(45) 授权公告日 2020.10.16

(21) 申请号 201510854441.2

(22) 申请日 2015.11.30

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 105640552 A

(43) 申请公布日 2016.06.08

(30) 优先权数据

2014-243867 2014.12.02 JP

2015-158756 2015.08.11 JP

(73) 专利权人 精工爱普生株式会社

地址 日本东京都

(72) 发明人 长坂公夫 宫坂光敏

(74) 专利代理机构 北京康信知识产权代理有限

责任公司 11240

代理人 田喜庆

(51) Int.Cl.

A61B 5/05 (2006.01)

G01R 33/032 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 103941199 A, 2014.07.23

US 6528993 B1, 2003.03.04

审查员 周生凯

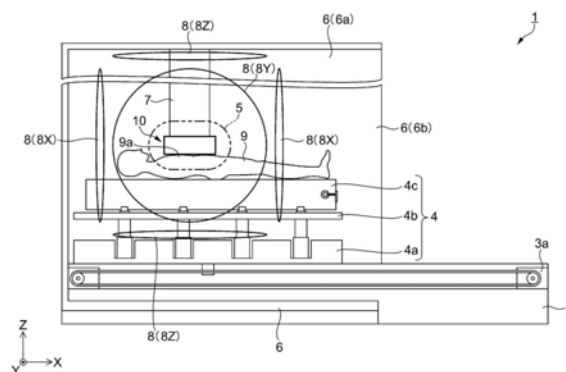
权利要求书5页 说明书28页 附图13页

(54) 发明名称

磁场测量方法以及磁场测量装置

(57) 摘要

本发明涉及磁场测量方法以及磁场测量装置。在光泵浦式的磁场测量中,能够测量探测光是单方向且多个方向的磁场。在磁场测量装置(1)中,光源(18)对气室(12)向Z轴方向照射兼具泵浦光和探测光的直线偏振光,磁场产生器(8)对气室(12),分别在X、Y轴方向施加作为取 n 个固定值 f_i ($i=1, \dots, n$)的振幅 A_0 的时间函数 $f(t)$ 的磁场 A_x 、以及作为取 m 个固定值 g_j ($j=1, \dots, m$)的振幅 A_0 的时间函数 $g(t)$ 的磁场 A_y 。运算控制部(30)使用人工磁场 A 的X、Y轴方向成分 A_x 、 A_y 以及与磁传感器(10)的测量值 W 相当的自旋极化度 M_x ,来计算测量区域的磁场 $C(C_x, C_y, C_z)$ 。



1. 一种磁场测量方法,其特征在于,

是磁场测量装置用于测量测量区域的磁场的磁场测量方法,

所述磁场测量装置,其第一方向、第二方向以及第三方向相互正交,

且具备:

光源,射出光;

介质,使所述光沿着所述第三方向通过,根据所述测量区域的磁场而使光学特性变化;

光检测器,检测所述光学特性;以及

第一磁场产生器,将所述第一方向的磁场施加给所述测量区域,

该磁场测量方法包含:

使所述第一磁场产生器产生所述第一方向侧第一能级的恒定磁场、所述第一方向侧第二能级的恒定磁场、以及所述第一方向侧第三能级的恒定磁场作为所述第一方向的磁场;以及

使用所述光检测器的检测结果以及所述第一方向的磁场,来计算所述测量区域的磁场,

计算所述测量区域的磁场的处理包含基于所述光检测器的检测结果来计算表示所述介质的磁化矢量的所述第一方向的成分的磁化值,使用产生所述第一方向侧第一能级的恒定磁场时的第1-1的磁化值、产生所述第一方向侧第二能级的恒定磁场时的第2-1的磁化值、产生所述第一方向侧第三能级的恒定磁场时的第3-1的磁化值以及所述第一方向的磁场,来计算所述测量区域的磁场,

计算所述测量区域的磁场的处理使作为所述第一方向的磁场的所述第一方向侧第i能级($i=1,2,3$)的恒定磁场与产生所述第一方向的磁场时的磁化值的每个组合适用下述公式1,

[式1]

$$M_{xi} = \frac{c}{a} \cdot \frac{C_x C_y + C_y A_{10} f_i + a C_z}{a^2 + C_x^2 + C_y^2 + C_z^2 + 2 C_x A_{10} f_i + (A_{10} f_i)^2} \cdots (1)$$

其中,所述测量区域的磁场 $C=(C_x, C_y, C_z)$, x, y, z 分别是所述第一方向、所述第二方向、所述第三方向的空间坐标, M_{xi} 是产生所述第一方向侧第i能级的恒定磁场时的磁化值, a, c 是常量, $A_{10} f_i$ 是所述第一方向侧第i能级的恒定磁场。

2. 根据权利要求1所述的磁场测量方法,其特征在于,

所述第一方向侧第一能级的恒定磁场、所述第一方向侧第二能级的恒定磁场以及所述第一方向侧第三能级的恒定磁场中的至少一个是零磁场。

3. 一种磁场测量方法,其特征在于,

是磁场测量装置用于测量测量区域的磁场的磁场测量方法,

所述磁场测量装置,其第一方向、第二方向以及第三方向相互正交,且具备:

光源,射出光;

介质,使所述光沿着所述第三方向通过,根据所述测量区域的磁场使光学特性变化;

光检测器,检测所述光学特性;以及

第二磁场产生器,将所述第二方向的磁场施加给所述测量区域,

该磁场测量方法包含:

使所述第二磁场产生器产生所述第二方向侧第一能级的恒定磁场、所述第二方向侧第二能级的恒定磁场以及所述第二方向侧第三能级的恒定磁场作为所述第二方向的磁场；以及

使用所述光检测器的检测结果以及所述第二方向的磁场，来计算所述测量区域的磁场，

计算所述测量区域的磁场的处理包含基于所述光检测器的检测结果来计算表示所述介质的磁化矢量的所述第一方向的成分的磁化值，使用产生所述第二方向侧第一能级的恒定磁场时的第1-1的磁化值、产生所述第二方向侧第二能级的恒定磁场时的第1-2的磁化值、产生所述第二方向侧第三能级的恒定磁场时的第1-3的磁化值以及所述第二方向的磁场，来计算所述测量区域的磁场，

计算所述测量区域的磁场的处理使作为所述第二方向的磁场的所述第二方向侧第j能级(j=1、2、3)的恒定磁场与产生所述第二方向的磁场时的磁化值的每个组合适用下述公式2，

[式2]

$$M_{xj} = \frac{c}{a} \cdot \frac{C_x C_y + C_x A_{20} g_j + a C_z}{a^2 + C_x^2 + C_y^2 + C_z^2 + 2 C_y A_{20} g_j + (A_{20} g_j)^2} \cdots (2)$$

其中，所述测量区域的磁场C=(C_x、C_y、C_z)，x、y、z分别是所述第一方向、所述第二方向、所述第三方向的空间坐标，M_{xj}是产生所述第二方向侧第j能级的恒定磁场时的磁化值，a、c是常量，A₂₀g_j是所述第二方向侧第j能级的恒定磁场。

4. 根据权利要求3所述的磁场测量方法，其特征在于，

所述第二方向侧第一能级的恒定磁场、所述第二方向侧第二能级的恒定磁场、以及所述第二方向侧第三能级的恒定磁场中的至少一个是零磁场。

5. 一种磁场测量方法，其特征在于，

是磁场测量装置用于测量测量区域的磁场的磁场测量方法，

所述磁场测量装置，其第一方向、第二方向以及第三方向相互正交，且具备：

光源，射出光；

介质，使所述光沿着所述第三方向通过，根据所述测量区域的磁场使光学特性变化；

光检测器，检测所述光学特性；

第一磁场产生器，将所述第一方向的磁场施加给所述测量区域；以及

第二磁场产生器，将所述第二方向的磁场施加给所述测量区域，

该磁场测量方法包含：

使所述第一磁场产生器产生所述第一方向侧第一能级的恒定磁场、以及所述第一方向侧第二能级的恒定磁场作为所述第一方向的磁场；

使所述第二磁场产生器产生所述第二方向侧第一能级的恒定磁场、以及所述第二方向侧第二能级的恒定磁场作为所述第二方向的磁场；以及

使用所述光检测器的检测结果、所述第一方向的磁场以及所述第二方向的磁场，来计算所述测量区域的磁场。

6. 根据权利要求5所述的磁场测量方法，其特征在于，

计算所述测量区域的磁场的处理包含基于所述光检测器的检测结果来计算表示所述

介质的磁化矢量的所述第一方向的成分的磁化值，

使用下述各项来计算所述测量区域的磁场：

1) 产生所述第一方向侧第一能级的恒定磁场以及所述第二方向侧第一能级的恒定磁场时的第1-1的磁化值、产生所述第一方向侧第一能级的恒定磁场以及所述第二方向侧第二能级的恒定磁场时的第1-2的磁化值、产生所述第一方向侧第二能级的恒定磁场以及所述第二方向侧第一能级的恒定磁场时的第2-1的磁化值、产生所述第一方向侧第二能级的恒定磁场以及所述第二方向侧第二能级的恒定磁场时的第2-2的磁化值中的3个以上的磁化值，

2) 所述第一方向的磁场，

3) 所述第二方向的磁场。

7. 根据权利要求6所述的磁场测量方法，其特征在于，

计算所述测量区域的磁场的处理基于作为所述第一方向的磁场的所述第一方向侧第i能级 ($i=1、2$) 的恒定磁场、作为所述第二方向的磁场的所述第二方向侧第j能级 ($j=1、2$) 的恒定磁场、以及产生所述第一方向的磁场以及所述第二方向的磁场时的磁化值的各个组合满足下述公式3，来计算所述测量区域的磁场，

[式3]

$$M_{xij} = \frac{c}{a} \cdot \frac{C_x C_y + C_x A_{20} g_j + C_y A_{10} f_i + A_{10} f_i A_{20} g_j + a C_z}{a^2 + C_x^2 + C_y^2 + C_z^2 + 2C_x A_{10} f_i + 2C_y A_{20} g_j + (A_{10} f_i)^2 + (A_{20} g_j)^2} \cdots (3)$$

其中，所述测量区域的磁场 $C = (C_x, C_y, C_z)$ ， $x、y、z$ 分别是所述第一方向、所述第二方向、所述第三方向的空间坐标， M_{xij} 是产生所述第一方向侧第i能级的恒定磁场和所述第二方向侧第j能级的恒定磁场时的磁化值， $a、c$ 是常量， $A_{10} f_i$ 是所述第一方向侧第i能级的恒定磁场， $A_{20} g_j$ 是所述第二方向侧第j能级的恒定磁场。

8. 根据权利要求5~7中任意一项所述的磁场测量方法，其特征在于，

所述第一方向侧第一能级的恒定磁场以及所述第一方向侧第二能级的恒定磁场的一方是零磁场，并且所述第二方向侧第一能级的恒定磁场以及所述第二方向侧第二能级的恒定磁场的一方是零磁场。

9. 一种磁场测量方法，其特征在于，

是磁场测量装置用于测量测量区域的磁场的磁场测量方法，

所述磁场测量装置，其第一方向、第二方向以及第三方向相互正，且具备：

光源，射出光；

介质，使所述光沿着所述第三方向通过，根据所述测量区域的磁场使光学特性变化；

光检测器，检测所述光学特性；

第一磁场产生器，将所述第一方向的磁场施加给所述测量区域；

第二磁场产生器，将所述第二方向的磁场施加给所述测量区域；以及

第三磁场产生器，将所述第三方向的磁场施加给所述测量区域，

该磁场测量方法包含：

使所述第一磁场产生器产生第一方向侧第一能级的恒定磁场作为所述第一方向的磁场；

使用所述光检测器的检测结果以及所述第一方向的磁场，来计算所述测量区域的磁场

作为原磁场的第二工序；

向所述测量区域配置测定对象物的第二工序；

使所述第一磁场产生器、所述第二磁场产生器以及所述第三磁场产生器产生作为欲形成于所述测量区域的磁场的靶磁场与所述原磁场的差分的磁场的第三工序；以及

在进行所述第三工序且所述第二工序结束期间使用所述光检测器的检测结果，来测定所述测定对象物产生的磁场的第四工序。

10. 一种磁场测量方法，其特征在于，

是磁场测量装置用于测量测量区域的磁场的磁场测量方法，

所述磁场测量装置，其第一方向、第二方向以及第三方向相互正交，且具备：

光源，射出光；

介质，使所述光沿着所述第三方向通过，根据所述测量区域的磁场使光学特性变化；

光检测器，检测所述光学特性；

第一磁场产生器，将所述第一方向的磁场施加给所述测量区域；

第二磁场产生器，将所述第二方向的磁场施加给所述测量区域；以及

第三磁场产生器，将所述第三方向的磁场施加给所述测量区域，

该磁场测量方法包含：

使所述第一磁场产生器产生第一方向侧第一能级的恒定磁场作为所述第一方向的磁场；

使用所述光检测器的检测结果以及所述第一方向的磁场，来计算所述测量区域的磁场作为原磁场的第二工序；

向所述测量区域配置测定对象物的第三工序；

使所述第一磁场产生器产生将欲形成于所述测量区域的磁场亦即靶磁场与所述原磁场的差分的磁场的第二方向的成分施加给所述第一方向侧第一能级的恒定磁场的恒定磁场，使所述第二磁场产生器产生所述差分的磁场的第三方向的成分的磁场的第三工序；以及

在进行所述第三工序且所述第二工序结束期间使用所述光检测器的检测结果和第一方向侧第二能级的恒定磁场，来测定所述测定对象物所产生的磁场的第四工序。

11. 一种磁场测量装置，其特征在于，

第一方向、第二方向以及第三方向相互正交，且具备：

光源，射出光；

介质，使所述光沿着所述第三方向通过，根据测量区域的磁场使光学特性变化；

光检测器，检测所述光学特性；

第一磁场产生器，将所述第一方向的磁场施加给所述测量区域；

第二磁场产生器，将所述第二方向的磁场施加给所述测量区域；以及

运算控制部，执行下述处理：

使所述第一磁场产生器产生所述第一方向侧第一能级的恒定磁场以及所述第一方向侧第二能级的恒定磁场作为所述第一方向的磁场；

使所述第二磁场产生器产生所述第二方向侧第一能级的恒定磁场以及所述第二方向侧第二能级的恒定磁场作为所述第二方向的磁场；以及

使用所述光检测器的检测结果、所述第一方向的磁场以及所述第二方向的磁场,来计算所述测量区域的磁场。

磁场测量方法以及磁场测量装置

技术领域

[0001] 本发明涉及利用了光的磁场测量方法以及磁场测量装置。

背景技术

[0002] 利用了光的磁场测量装置能够对来自心脏的磁场(心磁)、来自脑的磁场(脑磁)等由生物体产生的微少的磁场进行测量,期待被应用于医疗图像诊断装置等。在这样的磁场测量装置中,对装入有碱金属等的气(气体)的气室照射泵浦光以及探测光。被装入气室内的原子被泵浦光激发而自旋极化,透过该气室的探测光的偏振面利用磁光效应根据磁场而旋转。通过测定该气室的透过前后的探测光的偏振面的旋转角度,来测量磁场(例如,专利文献1)。

[0003] 专利文献1:日本特开2013-108833号公报

[0004] 现有的一般的光泵浦式的磁场测量装置在磁场的检测轴是单方向,检测轴和磁场的方向不同的情况下,测量磁场向检测轴的射影分量。但是,实际分布于空间的磁场是三维的矢量,在欲更加精密地测量磁场的情况下,优选测量XYZ正交三轴这样的三轴方向的磁场。由于检测轴为与探测光的照射方向对应的方向,所以简单地说,在通过增加探测光的照射方向来增加检测轴情况下,需要使各个照射方向精密地正交。若照射方向相对于假定的方向倾斜,则伴随于此在检测轴上产生倾斜,其结果为,在作为三维矢量的磁场的测量值上产生误差。

发明内容

[0005] 本发明是鉴于上述情况而完成的,其目的在于在光泵浦式的磁场测量中,能够测量探测光是单方向,并且多个方向的磁场,或者高精度地进行磁测量。

[0006] 应用例1

[0007] 用于解决上述课题的第一发明是磁场测量装置用于测量测量区域的磁场的磁场测量方法,该磁场测量装置的第一方向、第二方向以及第三方向相互正交,且具备:光源,射出光;介质,使上述光沿着上述第三方向通过,根据上述测量区域的磁场使光学特性变化;光检测器,检测上述光学特性;以及第一磁场产生器,将上述第一方向的磁场施加给上述测量区域,该磁场测量方法包含:使上述第一磁场产生器产生上述第一方向侧第一能级的恒定磁场、上述第一方向侧第二能级的恒定磁场、以及上述第一方向侧第三能级的恒定磁场作为上述第一方向的磁场;以及使用上述光检测器的检测结果以及上述第一方向的磁场,来计算上述测量区域的磁场。

[0008] 根据本应用例的磁场测量方法,能够通过仅对第三方向(Z方向)这样的单方向的光的照射,来计算测量区域的磁场矢量。即,能够通过仅对单方向的光的照射,来计算测量区域的磁场的第一方向(X方向)成分、第二方向(Y方向)成分以及第三方向(Z方向)成分。具体而言,对根据测量区域的磁场使光的光学特性变化的介质,施加3个能级的恒定磁场作为与光的射出方向亦即第三方向(Z方向)正交的第一方向(X方向)的磁场。而且,使用光的光

学特性的检测结果以及第一方向(X方向)的磁场来计算测量区域的磁场。

[0009] 应用例2

[0010] 作为第二发明,是根据第一发明的磁场测量方法,也可以构成计算上述测量区域的磁场的处理包含基于上述光检测器的检测结果来计算表示上述介质的磁化矢量的上述第一方向的成分的磁化值,使用产生上述第一方向侧第一能级的恒定磁场时的第1-1的磁化值、产生上述第一方向侧第二能级的恒定磁场时的第2-1的磁化值、产生上述第一方向侧第三能级的恒定磁场时的第3-1的磁化值、以及上述第一方向的磁场,来计算上述测量区域的磁场的磁场测量方法。

[0011] 根据本应用例的磁场测量方法,基于介质的光学特性的检测结果来计算表示介质的磁化矢量的第一方向(X方向)的成分的磁化值,使用作为第一方向(X方向)的磁场分别产生3个能级的恒定磁场时的3个磁化值以及第一方向(X方向)的磁场,来计算测量区域的磁场矢量(磁场的第一方向(X方向)成分、第二方向(Y方向)成分以及第三方向(Z方向)成分)。

[0012] 应用例3

[0013] 作为第三发明,根据第二发明的磁场测量方法,也可以构成计算上述测量区域的磁场的处理使作为上述第一方向的磁场的上述第一方向侧第i能级($i=1,2,3$)的恒定磁场与产生上述第一方向的磁场时的磁化值的各个组合适用下述公式1的磁场测量方法。

[0014] [式1]

$$[0015] \quad M_{xi} = \frac{c}{a} \cdot \frac{C_x C_y + C_y A_{10} f_i + a C_z}{a^2 + C_x^2 + C_y^2 + C_z^2 + 2 C_x A_{10} f_i + (A_{10} f_i)^2} \cdots (1)$$

[0016] 其中,上述测量区域的磁场 $C=(C_x, C_y, C_z)$, x, y, z 分别是上述第一方向、上述第二方向、上述第三方向的空间坐标, M_{xi} 是产生上述第一方向侧第i能级的恒定磁场时的磁化值, a, c 是常量, $A_{10} f_i$ 是上述第一方向侧第i能级的恒定磁场。

[0017] 根据本应用例的磁场测量方法,对作为第一方向(X方向)的磁场的3个能级的恒定磁场与产生该恒定磁场时的磁化值的各个组合,求解由将各值代入公式1所得的3个式子构成的连立方程式,从而能够计算作为三维矢量的介质的测量区域的磁场(C_x, C_y, C_z)。

[0018] 应用例4

[0019] 作为第四发明,根据第一~第三中任意一个磁场测量方法,也可以构成上述第一方向侧第一能级的恒定磁场、上述第一方向侧第二能级的恒定磁场以及上述第一方向侧第三能级的恒定磁场中的至少一个是零磁场的磁场测量方法。

[0020] 应用例5

[0021] 第五发明是磁场测量装置用于测量测量区域的磁场的磁场测量方法,该磁场测量装置的第一方向、第二方向以及第三方向相互正交,且具备:光源,射出光;介质,使上述光沿着上述第三方向通过,根据上述测量区域的磁场使光学特性变化;光检测器,检测上述光学特性;以及第二磁场产生器,将上述第二方向的磁场施加给上述测量区域,该磁场测量方法包含:使上述第二磁场产生器作为上述第二方向的磁场产生上述第二方向侧第一能级的恒定磁场、上述第二方向侧第二能级的恒定磁场、以及上述第二方向侧第三能级的恒定磁场;以及使用上述光检测器的检测结果以及上述第二方向的磁场,来计算上述测量区域的磁场。

[0022] 根据本应用例的磁场测量方法,能够通过仅向第三方向(Z方向)这样的单方向的

光的照射,来计算测量区域的磁场矢量。即,能够通过仅向单方向的光的照射,来计算测量区域的磁场的第二方向(Y方向)成分、第三方向(Z方向)成分。具体而言,对根据测量区域的磁场使光的光学特性变化的介质,施加3个能级的恒定磁场作为与光的射出方向亦即第三方向(Z方向)正交的第二方向(Y方向)的磁场。而且,使用光的光学特性的检测结果以及第二方向(Y方向)的磁场,来计算测量区域的磁场。

[0023] 应用例6

[0024] 作为第六发明,根据第五发明的磁场测量方法,也可以构成计算上述测量区域的磁场的处理包含基于上述光检测器的检测结果来计算表示上述介质的磁化矢量的上述第一方向的成分的磁化值,使用产生上述第二方向侧第一能级的恒定磁场时的第1-1的磁化值、产生上述第二方向侧第二能级的恒定磁场时的第1-2的磁化值、产生上述第二方向侧第三能级的恒定磁场时的第1-3的磁化值以及上述第二方向的磁场,来计算上述测量区域的磁场的磁场测量方法。

[0025] 根据本应用例的磁场测量方法,基于介质的光学特性的检测结果来计算表示介质的磁化矢量的第一方向(X方向)的成分的磁化值,使用作为第二方向(Y方向)的磁场分别产生3个能级的恒定磁场时的3个磁化值以及第二方向(Y方向)的磁场,来计算测量区域的磁场矢量(磁场的第二方向(Y方向)成分、第三方向(Z方向)成分)。

[0026] 应用例7

[0027] 作为第七发明,根据第六发明的磁场测量方法,也可以构成计算上述测量区域的磁场的处理使作为上述第二方向的磁场的上述第二方向侧第j能级(j=1、2、3)的恒定磁场与产生上述第二方向的磁场时的磁化值的各个组合适用下述公式2的磁场测量方法。

[0028] [式2]

$$[0029] \quad M_{xj} = \frac{c}{a} \cdot \frac{C_x C_y + C_x A_{20} g_j + a C_z}{a^2 + C_x^2 + C_y^2 + C_z^2 + 2 C_y A_{20} g_j + (A_{20} g_j)^2} \cdots (2)$$

[0030] 其中,上述测量区域的磁场 $C=(C_x, C_y, C_z)$,x、y、z分别是上述第一方向、上述第二方向、上述第三方向的空间坐标, M_{xj} 是产生上述第二方向侧第j能级的恒定磁场时的磁化值,a、c是常量, $A_{20} g_j$ 是上述第二方向侧第j能级的恒定磁场。

[0031] 根据本应用例的磁场测量方法,能够对作为第二方向(Y方向)的磁场的3个能级的恒定磁场与产生该恒定磁场时的磁化值的各个组合,求解由将各值代入公式2所得的3个式子构成的连立方程式,从而计算作为三维矢量的介质的测量区域的磁场(C_x, C_y, C_z)。

[0032] 应用例8

[0033] 作为第八发明,根据第五~第七中任意一个磁场测量方法,也可以构成上述第二方向侧第一能级的恒定磁场、上述第二方向侧第二能级的恒定磁场、以及上述第二方向侧第三能级的恒定磁场中的至少一个是零磁场的磁场测量方法。

[0034] 应用例9

[0035] 第九发明是磁场测量装置用于测量上述测量区域的磁场的磁场测量方法,磁场测量装置的第一方向、第二方向以及第三方向相互正交,具备:光源,射出光;介质,使上述光沿着上述第三方向通过,根据测量区域的磁场使光学特性变化;光检测器,检测上述光学特性;第一磁场产生器,将上述第一方向的磁场施加给上述测量区域;以及第二磁场产生器,将上述第二方向的磁场施加给上述测量区域,该磁场测量方法包含:使上述第一磁场产生

器产生上述第一方向侧第一能级的恒定磁场以及上述第一方向侧第二能级的恒定磁场作为上述第一方向的磁场;使上述第二磁场产生器产生上述第二方向侧第一能级的恒定磁场以及上述第二方向侧第二能级的恒定磁场作为上述第二方向的磁场;以及使用上述光检测器的检测结果、上述第一方向的磁场以及上述第二方向的磁场来计算上述测量区域的磁场。

[0036] 根据本应用例的磁场测量方法,能够通过仅向第三方向(Z方向)这样的单方向的光的照射,来计算测量区域的磁场矢量。具体而言,对根据测量区域的磁场使光的光学特性变化的介质,施加两个能级的恒定磁场作为与光的射出方向即第三方向(Z方向)正交的第一方向(X方向)的磁场,并施加两个能级的恒定磁场作为与第三方向(Z方向)以及第一方向(X方向)正交的第二方向(Y方向)的磁场。而且,使用光的光学特性的检测结果、第一方向(X方向)的磁场以及第二方向(Y方向)的磁场,来计算测量区域的磁场。

[0037] 应用例10

[0038] 作为第十发明,根据第九发明的磁场测量方法,也可以构成计算上述测量区域的磁场的处理包含基于上述光检测器的检测结果来计算表示上述介质的磁化矢量的上述第一方向的成分的磁化值,使用下述来计算上述测量区域的磁场:1)产生上述第一方向侧第一能级的恒定磁场、以及上述第二方向侧第一能级的恒定磁场时的第1-1的磁化值、产生上述第一方向侧第一能级的恒定磁场、以及上述第二方向侧第二能级的恒定磁场时的第1-2的磁化值、产生上述第一方向侧第二能级的恒定磁场、以及上述第二方向侧第一能级的恒定磁场时的第2-1的磁化值、产生上述第一方向侧第二能级的恒定磁场、以及上述第二方向侧第二能级的恒定磁场时的第2-2的磁化值中的3个以上的磁化值;2)上述第一方向的磁场;3)上述第二方向的磁场、的磁场测量方法。

[0039] 根据本应用例的磁场测量方法,基于介质的光学特性的检测结果来计算表示介质的磁化矢量的第一方向(X方向)的成分的磁化值,使用分别产生作为第一方向(X方向)的磁场的两个能级的恒定磁场、以及作为第二方向(Y方向)的磁场的两个能级的恒定磁场时的4个磁化值中的3个以上的磁化值、第一方向(X方向)的磁场以及第二方向(Y方向)的磁场,来计算测量区域的磁场。

[0040] 应用例11

[0041] 作为第十一发明,根据第十发明的磁场测量方法,也可以构成计算上述测量区域的磁场基于作为上述第一方向的磁场的上述第一方向侧第i能级($i=1,2$)的恒定磁场、作为上述第二方向的磁场的上述第二方向侧第j能级($j=1,2$)的恒定磁场、以及产生上述第一方向的磁场以及上述第二方向的磁场时的磁化值的各个组合满足下述公式3,来计算上述测量区域的磁场的磁场测量方法。

[0042] [式3]

$$[0043] \quad M_{xij} = \frac{c}{a} \cdot \frac{C_x C_y + C_x A_{20} g_j + C_y A_{10} f_i + A_{10} f_i A_{20} g_j + a C_z}{a^2 + C_x^2 + C_y^2 + C_z^2 + 2C_x A_{10} f_i + 2C_y A_{20} g_j + (A_{10} f_i)^2 + (A_{20} g_j)^2} \cdots (3)$$

[0044] 其中,上述测量区域的磁场 $C=(C_x, C_y, C_z)$, x, y, z 分别是上述第一方向、上述第二方向、上述第三方向的空间坐标, M_{xij} 是产生上述第一方向侧第i能级的恒定磁场和上述第二方向侧第j能级的恒定磁场时的磁化值, a, c 是常量, $A_{10} f_i$ 是上述第一方向侧第i能级的恒定磁场, $A_{20} g_j$ 是上述第二方向侧第j能级的恒定磁场。

[0045] 根据本应用例的磁场测量方法,能够对作为第一方向(X方向)的磁场的X侧第i能级的恒定磁场、作为第二方向(Y方向)的磁场的Y侧第j能级的恒定磁场、以及产生该第一方向(X方向)的磁场以及第二方向(Y方向)的磁场时的磁化值的各个组合,求解由将各值代入公式3所得的4个式子构成的连立方程式,从而计算作为三维矢量的介质的测量区域的磁场(C_x 、 C_y 、 C_z)。

[0046] 应用例12

[0047] 作为第十二发明,根据第九~第十一中任意一个发明的磁场测量方法,也可以构成上述第一方向侧第一能级的恒定磁场、以及上述第一方向侧第二能级的恒定磁场的一方是零磁场,并且上述第二方向侧第一能级的恒定磁场、以及上述第二方向侧第二能级的恒定磁场的一方是零磁场的磁场测量方法。

[0048] 应用例13

[0049] 第十三发明是磁场测量装置用于测量上述测量区域的磁场的磁场测量方法,该磁场测量装置的第一方向、第二方向以及第三方向相互正交,具备:光源,射出光;介质,使上述光沿着上述第三方向通过,根据测量区域的磁场使光学特性变化;光检测器,检测上述光学特性;第一磁场产生器,将上述第一方向的磁场施加给上述测量区域;第二磁场产生器,将上述第二方向的磁场施加给上述测量区域;以及第三磁场产生器,将上述第三方向的磁场施加给上述测量区域,该磁场测量方法包含:使上述第一磁场产生器产生第一方向侧第一能级的恒定磁场作为上述第一方向的磁场;使用上述光检测器的检测结果以及上述第一方向的磁场来计算上述测量区域的磁场作为原磁场的第一工序;向上述测量区域配置测定对象物的第二工序;使上述第一磁场产生器、上述第二磁场产生器以及上述第三磁场产生器产生欲形成于上述测量区域的磁场即靶磁场与上述原磁场的差分的磁场的第三工序;以及在上述第三工序且上述第二工序结束的期间使用上述光检测器的检测结果,来测定上述测定对象物所产生的磁场的第四工序。

[0050] 根据本应用例的磁场测量方法,能够在将测量区域作为规定的靶磁场的状态下,测定测定对象物所产生的磁场。例如,若为了抵消从外部漏入测量区域的原磁场,将靶磁场作为零磁场,则能够准确地测量测定对象物所产生的磁场。

[0051] 应用例14

[0052] 第十四发明是磁场测量装置用于测量上述测量区域的磁场的磁场测量方法,该磁场测量装置的第一方向、第二方向以及第三方向相互正交,且具备:光源,射出光;介质,使上述光沿着上述第三方向通过,根据测量区域的磁场使光学特性变化;光检测器,其检测上述光学特性;第一磁场产生器,将上述第一方向的磁场施加给上述测量区域;第二磁场产生器,将上述第二方向的磁场施加给上述测量区域;第三磁场产生器,将所述第三方向的磁场施加给上述测量区域,该磁场测量方法包含:使上述第一磁场产生器作为上述第一方向的磁场,产生第一方向侧第一能级的恒定磁场;使用上述光检测器的检测结果以及上述第一方向的磁场来计算上述测量区域的磁场作为原磁场的第一工序;向上述测量区域配置测定对象物的第二工序;使上述第一磁场产生器产生将欲形成于上述测量区域的磁场即靶磁场与上述原磁场的差分的磁场的第三方向的成分施加给上述第一方向侧第一能级的恒定磁场的恒定磁场、使上述第二磁场产生器产生上述差分的磁场的第二方向的成分的磁场、使上述第三磁场产生器产生上述差分的磁场的第三方向的成分的磁场的第三工序;以及在进

行上述第三工序且上述第二工序结束的期间使用上述光检测器的检测结果和第一方向侧第四能级的恒定磁场,来测定上述测定对象物所产生的磁场的第四工序。

[0053] 根据本应用例的磁场测量方法,能够在将测量区域作为规定的靶磁场的状态下,对测定对象物所产生的磁场进行测定。例如,若为了抵消从外部漏入测量区域的原磁场,将靶磁场设为零磁场,则能够作为矢量准确地测量测定对象物所产生的磁场。

[0054] 应用例15

[0055] 第十五发明是磁场测量装置,其第一方向、第二方向以及第三方向相互正交,且具备:光源,射出光;介质,使上述光沿着上述第三方向通过,根据测量区域的磁场使光学特性变化;光检测器,检测上述光学特性;第一磁场产生器,将上述第一方向的磁场施加给上述测量区域;以及运算控制部,其执行使上述第一磁场产生器产生上述第一方向侧第一能级的恒定磁场、上述第一方向侧第二能级的恒定磁场、和上述第一方向侧第三能级的恒定磁场作为上述第一方向的磁场,以及使用上述光检测器的检测结果以及上述第一方向的磁场来计算上述测量区域的磁场。

[0056] 根据本应用例的磁场测量装置,能够通过向第三方向(Z方向)这样的单方向的光的照射,来计算测量区域的磁场矢量。即,能够通过向单方向的光的照射,来计算测量区域的磁场的第一方向(X方向)成分、第二方向(Y方向)成分以及第三方向(Z方向)成分。具体而言,对根据测量区域的磁场使光的光学特性变化的介质,施加3个能级的恒定磁场作为与光的射出方向即第三方向(Z方向)正交的第一方向(X方向)的磁场。而且,使用光的光学特性的检测结果和第一方向(X方向)的磁场,来计算测量区域的磁场。

[0057] 应用例16

[0058] 第十六发明是磁场测量装置,磁场测量装置是第一方向、第二方向以及第三方向相互正交,具备:光源,射出光;介质,使上述光沿着上述第三方向通过,根据测量区域的磁场使光学特性变化;光检测器,检测上述光学特性;第二磁场产生器,将上述第二方向的磁场施加给上述测量区域;以及运算控制部,执行使上述第二磁场产生器产生上述第二方向侧第一能级的恒定磁场、上述第二方向侧第二能级的恒定磁场、以及上述第二方向侧第三能级的恒定磁场作为上述第二方向的磁场,和使用上述光检测器的检测结果以及上述第二方向的磁场,来计算上述测量区域的磁场。

[0059] 根据本应用例的磁场测量装置,能够通过向第三方向(Z方向)这样的单方向的光的照射,来计算测量区域的磁场矢量。即,能够通过向单方向的光的照射,来计算测量区域的磁场的第一方向(X方向)成分、第二方向(Y方向)成分以及第三方向(Z方向)成分。具体而言,对根据测量区域的磁场使光的光学特性变化的介质,施加3个能级的恒定磁场作为与光的射出方向亦即第三方向(Z方向)正交的第二方向(Y方向)的磁场。而且,使用光的光学特性的检测结果和第二方向(Y方向)的磁场,来计算测量区域的磁场。

[0060] 应用例17

[0061] 第十七发明是具备磁场测量装置,其第一方向、第二方向以及第三方向相互正交,且具备:光源,射出光;介质,使上述光沿着上述第三方向通过,根据测量区域的磁场使光学特性变化;光检测器,检测上述光学特性;第一磁场产生器,将上述第一方向的磁场施加给上述测量区域;第二磁场产生器,将上述第二方向的磁场施加给上述测量区域;以及运算控制部,使上述第一磁场产生器产生上述第一方向侧第一能级的恒定磁场以及上述第一方向

侧第二能级的恒定磁场作为上述第一方向的磁场,使上述第二磁场产生器产生上述第二方向侧第一能级的恒定磁场、以及上述第二方向侧第二能级的恒定磁场作为上述第二方向的磁场,使用上述光检测器的检测结果、上述第一方向的磁场以及上述第二方向的磁场,来计算上述测量区域的磁场。

[0062] 根据本应用例的磁场测量装置,能够通过向第三方向(Z方向)这样的单方向的光的照射,来计算测量区域的磁场矢量。具体而言,对根据测量区域的磁场使光的光学特性变化的介质,施加两个能级的恒定磁场作为与光的射出方向亦即第三方向(Z方向)正交的第一方向(X方向)的磁场,并施加两个能级的恒定磁场作为与第三方向(Z方向)以及第一方向(X方向)正交的第二方向(Y方向)的磁场。而且,使用光的光学特性的检测结果、第一方向(X方向)的磁场以及第二方向(Y方向)的磁场,来计算测量区域的磁场。

附图说明

[0063] 图1是表示本实施方式所涉及的磁场测量装置的结构的一个例子的简要侧视图。

[0064] 图2是对本实施方式所涉及的磁场产生器的结构进行说明的示意图,具体而言,是从Y方向观察到的图。

[0065] 图3是对本实施方式所涉及的磁场产生器的结构进行说明的示意图,具体而言,是从X方向观察到的图。

[0066] 图4是对本实施方式所涉及的磁场产生器的结构进行说明的示意图,具体而言,是从Z方向观察到的图。

[0067] 图5是对本实施方式所涉及的磁传感器的结构进行说明的示意图,具体而言,是从Z方向观察到的俯视图。

[0068] 图6是对本实施方式所涉及的磁传感器的结构进行说明的示意图,具体而言,是从Y方向观察到的侧视图。

[0069] 图7是本实施方式所涉及的运算控制部的功能结构图。

[0070] 图8是对没有磁场的情况下的对准进行说明的图。

[0071] 图9是对磁场的对准的变化进行说明的图。

[0072] 图10是对由透过气室引起的直线偏振光的偏振面的变化进行说明的图。

[0073] 图11是对由透过气室引起的直线偏振光的偏振面的变化进行说明的图。

[0074] 图12是表示对准方位角 θ 与探测光的检测结果的关系的图。

[0075] 图13是表示对准方位角 θ 与探测光的检测结果的关系的图。

[0076] 图14是表示对准方位角 θ 与探测光的检测结果的关系的图。

[0077] 图15是表示对准方位角 θ 与探测光的检测结果的关系的图。

[0078] 图16是表示对准方位角 θ 与探测光的检测结果的关系的图。

具体实施方式

[0079] 以下,根据附图对实施方式进行说明。

[0080] 此外,为了各附图的各部件在各附图上为能够视觉确认的程度的大小,所以按照各部件使比例尺不同来图示。

[0081] 磁场测量装置的结构

[0082] 首先,对本实施方式所涉及的磁场测量装置的结构例进行说明。图1是表示本实施方式所涉及的磁场测量装置的结构的一个例子的简要侧视图。图2是对本实施方式所涉及的磁场产生器的结构进行说明的图,具体而言,是从Y方向观察到的图。图3是对本实施方式所涉及的磁场产生器的结构进行说明的图,具体而言,是从X方向观察到的图。图4是对本实施方式所涉及的磁场产生器的结构进行说明的图,具体而言,是从Z方向观察到的图。图5是对本实施方式所涉及的磁传感器的结构进行说明的示意图,具体而言,是从Z方向观察到的俯视图。图6是对本实施方式所涉及的磁传感器的结构进行说明的示意图,具体而言,是从Y方向观察到的侧视图。图7是本实施方式所涉及的运算控制部的功能结构图。

[0083] 图1所示的磁场测量装置1是将测量对象物所产生的磁场作为矢量来测量的测量装置。其中,将测量与测量对象物所产生的磁场相关的一部分的信息(例如,其一个成分、大小、有无等)的装置称为磁测量装置。在本实施方式中,将测量对象物设为人体(被检体),将测量对象物所发出的磁场设为心磁(由心脏的电生理学的活动产生的磁场)、脑磁。在这里,以磁场测量装置1将心磁作为矢量来测量的测量装置的情况为例来进行说明。

[0084] 磁场测量装置1是使用光泵浦法来测量磁场的装置,是兼用泵浦光和探测光的所谓单光束方式。此外,并不局限于单光束方式的结构,也可以为将用于照射泵浦光的光源和用于照射探测光的光源分离的所谓双光束方式的结构。如图1所示,磁场测量装置1具备底座3、工作台4、磁屏蔽装置6、磁场产生器8、磁传感器10、以及运算控制部30(参照图7)。

[0085] 在图6所示的磁传感器10中,将从光源18射出的激光(也称为照射光)18a通过气室12的方向(照射方向)设为第三方向(在本实施方式中为Z方向)。将照射光的直线偏振光成分的振动方向设为第二方向(在本实施方式中为Y方向)。将与第二方向(Y方向)以及第三方向(Z方向)正交的方向设为第一方向(在本实施方式中为X方向)。而且,将第一方向(X方向)、第二方向(Y方向)、第三方向(Z方向)作为正交坐标系的轴向,以下分别称呼为X轴方向、Y轴方向、Z轴方向。

[0086] 在图1中,Z轴方向是铅垂方向,是磁场测量装置1的高度方向(图1的上下方向)。X轴方向以及Y轴方向是水平方向,是底座3、工作台4的上面延伸的方向。躺卧的状态的被检体9的身高方向(图1的左右方向)为沿着X轴方向的方向。因此,与被检体9的身高方向交叉的方向(从图1的里侧朝向跟前的方向)是Y轴方向。

[0087] 底座3被配置于磁屏蔽装置6(主体部6a)的内侧的底面上,沿着作为被检体9能够移动方向的X轴方向延伸到主体部6a的外侧。工作台4具有第一工作台4a、第二工作台4b、以及第三工作台4c。在底座3上设置有通过直动机构3a沿着X轴方向移动的第一工作台4a。在第一工作台4a上设置有通过未图示的升降装置沿着Z轴方向升降的第二工作台4b。在第二工作台4b上设置有通过未图示的直动机构在导轨上沿着Y轴方向移动的第三工作台4c。

[0088] 磁屏蔽装置6具备具有开口部6b的角筒状的主体部6a。主体部6a的内部为空洞,在Y轴方向以及Z轴方向构成的面(在Y-Z剖面上与X轴方向正交的平面)的剖面形状大体为四边形。在测量心磁时,被检体9以躺卧在工作台4上的状态被收纳在主体部6a的内部。主体部6a沿X轴方向延伸,其本身作为被动式磁屏蔽发挥功能。

[0089] 底座3从主体部6a的开口部6b向+X方向突出。磁屏蔽装置6的大小例如,X轴方向的长度约为200cm左右,开口部6b的一边是90cm左右。而且,躺卧于工作台4的被检体9能够与工作台4一起在底座3上沿着X轴方向移动,从开口部6b出入磁屏蔽装置6内。

[0090] 磁屏蔽装置6的主体部6a由相对磁导率例如是数千以上的强磁性体,或者高传导率的导体形成。强磁性体能够使用坡莫合金、铁素体、或者铁、铬或钴系的非晶体等。高传导率的导体能够使用例如由铝等通过涡流效应而具有磁场减少效果的材料。此外,还能够交替地层叠强磁性体和高传导率的导体来形成主体部6a。

[0091] 在主体部6a的内部设置有磁场产生器8。磁场产生器8由3轴亥姆霍兹线圈构成,能够对测量区域5,在X轴、Y轴以及Z轴的各轴向产生规定磁场。即,磁场产生器8至少包含产生X轴方向的磁场的第一磁场产生器8X、以及产生Y轴方向的磁场的第二磁场产生器8Y,优选还包含产生Z轴方向的磁场的第三磁场产生器8Z。

[0092] 在本实施方式中,磁场产生器8包含第一磁场产生器(沿着X轴方向对置的一对亥姆霍兹线圈)8X、第二磁场产生器(沿着Y轴方向对置的一对亥姆霍兹线圈)8Y、以及第三磁场产生器(沿着Z轴方向对置的一对亥姆霍兹线圈)8Z。磁屏蔽装置6的主体部6a内的成为磁场测量装置1测量心磁的对象区域是测量区域5。作为被检体9的测量位置的胸部9a和磁传感器10被配置于测量区域5内。

[0093] 如图2、图3以及图4所示,磁场产生器8所包含的亥姆霍兹线圈8X、亥姆霍兹线圈8Y以及亥姆霍兹线圈8Z的直径比测量区域5的直径大。即,测量区域5被内包在由第一磁场产生器8X、第二磁场产生器8Y以及第三磁场产生器8Z围起的区域。优选这些亥姆霍兹线圈8X、8Y、8Z的中心、测量区域5的中心、以及磁传感器10的中心大致一致。若像这样,在测量区域5中,能够高精度地测量作为三维矢量的磁场。

[0094] 另外,优选对置的一对亥姆霍兹线圈彼此之间的距离比其它亥姆霍兹线圈的直径大。例如,如图2、图3、以及图4所示,优选对置的一对亥姆霍兹线圈8X彼此之间的距离比亥姆霍兹线圈8Y以及亥姆霍兹线圈8Z的直径大。若像这样,能够通过一对亥姆霍兹线圈8Y(或者8Z),沿着Y轴(或者Z轴)产生平行且均匀的磁场。同样地,优选一对亥姆霍兹线圈8Y(或者8Z)彼此之间的距离也比其它亥姆霍兹线圈的直径大。

[0095] 在图2、图3以及图4中,假设一对亥姆霍兹线圈8X彼此之间的距离(例如在图2的情况下,左侧的亥姆霍兹线圈8X和右侧的亥姆霍兹线圈8X的沿着X轴的距离)比其它亥姆霍兹线圈8Y以及亥姆霍兹线圈8Z的直径小。在该情况下,亥姆霍兹线圈8X进入将一对亥姆霍兹线圈8Y(或者8Z)作为底面的圆柱状的区域的内侧。这样,通过一对亥姆霍兹线圈8Y(或者8Z)形成的磁场产生形变,难以在测量区域5附近沿着Y轴(或者Z轴)产生平行且均匀的磁场。

[0096] 与此相对,在一对亥姆霍兹线圈8X彼此之间的距离比其它亥姆霍兹线圈8Y以及亥姆霍兹线圈8Z的直径大的情况下,亥姆霍兹线圈8X被配置于以一对亥姆霍兹线圈8Y(或者8Z)作为底面的圆柱状区域的外侧。这样,通过亥姆霍兹线圈8X,抑制了通过一对亥姆霍兹线圈8Y(或者8Z)形成的磁场的形变,能够在测量区域5附近沿着中Y轴(或者Z轴)产生平行且均匀的磁场。

[0097] 像这样,优选在将一对亥姆霍兹线圈8X作为底面的圆柱状区域的外侧,配置一对亥姆霍兹线圈8Y和一对亥姆霍兹线圈8Z。而且,优选在将一对亥姆霍兹线圈8Y作为底面的圆柱状区域的外侧配置一对亥姆霍兹线圈8Z和一对亥姆霍兹线圈8X,在将一对亥姆霍兹线圈8Z作为底面的圆柱状区域的外侧配置一对亥姆霍兹线圈8X和一对亥姆霍兹线圈8Y。

[0098] 此外,在本实施方式中将亥姆霍兹线圈的形状作为圆形来进行说明,但亥姆霍兹线圈的形状不限于圆形,也可以是四边形等多边形。在亥姆霍兹线圈的形状是多边形的情况下,在将一对亥姆霍兹线圈作为底面的棱柱状的区域外,配置与该棱柱的高度方向正交的其它亥姆霍兹线圈。

[0099] 磁传感器10被经由支承部件7固定于主体部6a的顶棚。磁传感器10对测量区域5在Z轴方向上的磁场的强度成分进行测量。磁传感器10使用光泵浦法来测量磁场。在测量被检体9的心磁时,使第一工作台4a以及第三工作台4c移动以便作为被检体9的测量位置的胸部9a处于与磁传感器10对置的位置,使第二工作台4b上升以便胸部9a接近磁传感器10。

[0100] 在使用了光泵浦式的磁传感器10的微弱磁场的测量中,优选消除存在于配置了气室12的测量区域5的、例如地磁、都市噪声等因环境从外部流入的磁场(原磁场)。因为若存在原磁场,则受到其影响,导致针对测量对象物(被检体9)所产生的磁场的灵敏度的降低、测量精度的降低。在本实施方式中,通过磁屏蔽装置6抑制从外部向测量区域5的磁场的流入。而且,能够通过配置于主体部6a的内部磁场产生器8将测量区域5附近保持在接近零磁场的低磁场。

[0101] 如图5所示,磁传感器10具有光源18、气室12、以及光检测器14、15。光源18输出与铯的吸收线对应的波长的激光18a。激光18a的波长并没有被特别限定,在本实施方式中,例如,设定为与D1线相当的894nm的波长。光源18是可调谐激光器,从光源18输出的激光18a是具有一定的光量的连续光。

[0102] 在本实施方式中,光源18被设置于运算控制部30。从光源18发出的激光18a通过光纤19被供给至磁传感器10的主体。磁传感器10的主体和光纤19经由光连接器20连接。经由光连接器20供给的激光18a向-Y方向行进而入射至偏光板21。通过偏光板21的激光18a为直线偏振光。而且,激光18a依次入射至第一半透半反镜22、第二半透半反镜23、第三半透半反镜24、第一反射镜25。

[0103] 第一半透半反镜22、第二半透半反镜23以及第三半透半反镜24对激光18a的一部分进行反射使其向+X方向行进,并使一部分激光18a通过使其向-Y方向行进。第一反射镜25将入射的激光18a全部向+X方向反射。通过第一半透半反镜22、第二半透半反镜23、第三半透半反镜24、第一反射镜25,将激光18a分割为4个光路。以各光路的激光18a的光强度成为相同的光强度的方式,设定各反射镜的反射率。

[0104] 接下来,如图6所示,激光18a依次照射入射至第四半透半反镜26、第五半透半反镜27、第六半透半反镜28、第二反射镜29。第四半透半反镜26、第五半透半反镜27以及第六半透半反镜28对激光18a的一部分进行反射使其向+Z方向行进,使一部分激光18a通过使其向+X方向行进。第二反射镜29将入射的激光18a全部向+Z方向反射。

[0105] 利用第四半透半反镜26、第五半透半反镜27、第六半透半反镜28、第二反射镜29,将一个光路的激光18a分割为4个光路。以各光路的激光18a的光强度成为相同的光强度的方式,设定各反射镜的反射率。因此,激光18a分离为16个光路。而且,以各光路的激光18a的光强度成为相同的强度的方式,设定各反射镜的反射率。

[0106] 在第四半透半反镜26、第五半透半反镜27、第六半透半反镜28、第二反射镜29的+Z方向侧,在激光18a的各光路设置有4行4列16个气室12。而且,被第四半透半反镜26、第五半透半反镜27、第六半透半反镜28、第二反射镜29反射的激光18a通过气室12。

[0107] 气室12是在内部具有空隙的箱,在该空隙装入有作为根据测量区域5(参照图1)的磁场而使光的光学特性变化的介质的碱金属的气体。碱金属。并没有被特别限定,能够使用钾、铷或者铯。在本实施方式中,例如碱金属使用铯。

[0108] 在各气室12的+Z方向侧设置有偏振光分离器13。偏振光分离器13是将入射的激光18a分离为相互正交的两个偏振光成分的激光18a的元件。偏振光分离器13例如能够使用沃拉斯顿棱镜或者偏振分束器。

[0109] 在偏振光分离器13的+Z方向侧设置有光检测器14,在偏振光分离器13的+X方向侧设置有光检测器15。通过偏振光分离器13的激光18a入射至光检测器14,被偏振光分离器13反射的激光18a入射至光检测器15。光检测器14以及光检测器15将与入射的激光18a的受光光量对应的信号输出至运算控制部30。

[0110] 由于若光检测器14、15产生磁场则有给测定带来影响的可能性,所以优选光检测器14、15由非磁性的材料构成。磁传感器10具有被设置于X轴方向的两面以及Y轴方向的两面的加热器16。加热器16优选不产生磁场的构造,例如,能够使用在流路中使蒸气、热风通过来加热的方式的加热器。也可以代替加热器,通过高频电压来对气室12进行介电加热。

[0111] 磁传感器10被配置于被检体9(参照图1)的+Z方向侧。由磁传感器10在测量区域5检测的磁场矢量B(包含测定对象物所产生的对象磁场矢量)从-Z方向侧进入磁传感器10。磁场矢量B在通过第四半透半反镜26~第二反射镜29,并通过气室12后,通过偏振光分离器13从磁传感器10出来。

[0112] 磁传感器10是被称为光泵浦式磁传感器、光泵浦原子磁传感器的传感器。气室12内的铯被加热而成为气体状态。而且,通过将成为直线偏振光的激光18a照射至铯气体,铯原子被激发且使磁力矩的方向一致。在该状态下磁场矢量B通过气室12时,铯原子的磁力矩通过磁场矢量B的磁场进动。将该进动称为拉莫尔进动。

[0113] 拉莫尔进动的大小具有与磁场矢量B的强度正的相关。拉莫尔进动使激光18a的偏转面旋转。拉莫尔进动的大小和激光18a的偏转面的旋转角的变化量具有正的相关。因此,磁场矢量B的强度和激光18a的偏转面的旋转角的变化量具有正的相关。磁传感器10的灵敏度在磁场矢量B的Z轴方向升高,在与Z轴方向正交的方向降低。

[0114] 偏振光分离器13将透过气室12的激光18a分离为相互正交的轴向(图11所示的 α 轴以及 β 轴)的2个成分的直线偏振光。分离出的一方的直线偏振光被导入光检测器14,另一方的直线偏振光被导入光检测器15。而且,光检测器14以及光检测器15接收正交的2个成分各自的直线偏振光,产生与受光光量对应的信号并输出至运算控制部30。能够通过检测各个直线偏振光的强度,来检测激光18a的偏转面的旋转角。而且,能够根据激光18a的偏转面的旋转角的变化,来检测磁场矢量B的强度。

[0115] 将由气室12、偏振光分离器13、光检测器14以及光检测器15构成的元件称为传感器元件11。在本实施方式中,在磁传感器10配置有4行4列16个传感器元件11。磁传感器10的传感器元件11的个数以及配置并没有被特别限定。传感器元件11也可以3行以下也可以5行以上。同样,传感器元件11也可以3列以下也可以5列以上。传感器元件11的个数越多越能够提高空间分辨率。

[0116] 如图7所示,运算控制部30具有操作部31、显示部32、通信部33、处理部40以及存储部50。操作部31是按钮开关、触摸面板、键盘、各种传感器等输入装置,将与进行的操作对应

的操作信号输出至处理部40。通过该操作部31,进行磁场测量的开始指示等各种指示输入。

[0117] 显示部32是LCD(Liquid Crystal Display:液晶显示器)等显示装置,进行基于来自处理部40的显示信号的各种显示。在该显示部32显示测量结果等。通信部33是无线通信器、调制解调器、有线用的通信电缆的插座、控制电路等通信装置,与被给予的通信线路连接来实现与外部的通信。

[0118] 处理部40例如通过CPU(Central Processing Unit:中央处理单元)、GPU(Graphics Processing Unit:图形处理单元)等微处理器、ASIC(针对特定用途的集成电路:Application Specific Integrated Circuit)、IC(Integrated Circuit:集成电路)存储器等电子部件来实现。处理部40基于规定的程序、数据、来自操作部31的操作信号、来自磁传感器10的测量信号等来执行各种运算处理,并控制运算控制部30的动作。

[0119] 处理部40具有照射控制部41、磁场产生控制部42、原磁场计算部43、偏置磁场决定部44以及对象磁场计算部45。处理部40执行根据存储部50所存储的磁场测量程序51的磁测量处理(参照图13所示的流程图)。

[0120] 在本实施方式所涉及的磁测量处理中,例如在进行人体的心脏、脑这样测定对象物所产生的磁场的测定前,作为初始设定,计算未放置测定对象物的状态的测量区域5的原磁场 C_x 。而且,在使磁场产生器8产生了像消除原磁场 C_x 那样的偏置磁场的状态下,进行测定对象物所产生的磁场的测定。即,测定对象物(被检体9)所产生的磁场的测量在减少了流入测量区域5的外部磁场(原磁场)的状态下实施。

[0121] 照射控制部41控制磁传感器10的光源18的照射光的照射。具体而言,照射控制部41除了光源18的照射光的照射的开始、结束以外,还控制照射光的光强度、照射光所包含的直线偏振面的方向等。

[0122] 磁场产生控制部42对磁场产生器8(8X、8Y、8Z),以在X、Y、Z轴方向分别产生规定的磁场的方式进行控制。具体而言,磁场产生控制部42在初始设定时使磁场产生器8(8X、8Y、8Z)产生规定的人工磁场A(A_x 、 A_y 、 A_z)。详细内容后述,但人工磁场A是其第一方向(X方向)成分以及第二方向(Y方向)成分是振幅以及周期相同且相位不同的交变磁场 $f(\omega t)$,其第三方向(Z方向)成分为零($A_z=0$)的磁场矢量。人工磁场A(A_x 、 A_y 、 A_z)作为人工磁场数据52被存储至存储部50。

[0123] 另外,磁场产生控制部42在测定时使磁场产生器8(8X、8Y、8Z)产生由偏置磁场决定部44决定出的偏置磁场 B_b (B_{bx} 、 B_{by} 、 B_{bz})与人工磁场A(A_x 、 A_y 、 A_z)的合成磁场(B_b+A)。

[0124] 此外,也可以使磁场产生器8X依次产生X侧第一能级的恒定磁场、X侧第二能级的恒定磁场以及X侧第三能级的恒定磁场作为人工磁场A的X轴方向成分 A_x 。同样,也可以使磁场产生器8Y依次产生Y侧第一能级的恒定磁场、Y侧第二能级的恒定磁场以及Y侧第三能级的恒定磁场作为人工磁场A的Y轴方向成分 A_y 。另外,也可以使磁场产生器8X依次产生X侧第一能级的恒定磁场、以及X侧第二能级的恒定磁场作为人工磁场A的X轴方向成分 A_x ,使磁场产生器8Y依次产生Y侧第一能级的恒定磁场以及Y侧第二能级的恒定磁场作为人工磁场A的Y轴方向成分 A_y 。

[0125] 原磁场计算部43在磁场产生器8(8X、8Y、8Z)产生人工磁场矢量A(A_x 、 A_y 、 A_z)的状态下,基于从磁传感器10输出的信号,来计算原磁场矢量C(C_x 、 C_y 、 C_z)。具体而言,将基于从磁传感器10输出的信号得到的磁传感器测量值(平方差W-)作为自旋极化度 M_x ,获取某一时刻

t的人工磁场矢量A的X轴方向成分 A_x 的值 $A_x(t)$ 、以及Y轴方向成分 A_y 的值 $A_y(t)$ 与自旋极化度 $M_x(t)$ 的组合,且是自旋极化度 M_x 不同的3个以上的组合。

[0126] 而且,定义由将获取到的组合分别代入后述的公式17而得到的3个以上的式子构成的连立方程式,并执行求解该连立方程式的规定的算术运算处理,从而计算原磁场矢量C(C_x 、 C_y 、 C_z)。计算出的原磁场C(C_x 、 C_y 、 C_z)作为原磁场数据53被存储至存储部50。

[0127] 偏置磁场决定部44决定消除由原磁场计算部43计算出的原磁场矢量C(C_x 、 C_y 、 C_z)的偏置磁场 B_b (B_{bx} 、 B_{by} 、 B_{bz})。决定出的偏置磁场 B_b (B_{bx} 、 B_{by} 、 B_{bz})作为偏置磁场数据54存储至存储部50。

[0128] 对象磁场计算部45在配置有测定对象物,磁场产生器8产生偏置磁场 B_b 的状态下,基于从磁传感器10输出的信号,计算该测定对象物所产生的对象磁场矢量B(B_x 、 B_y 、 B_z)。具体而言,将基于从磁传感器10输出的信号得到的测量值(平方差W-)作为自旋极化度 M_x ,获取某一时刻t的人工磁场矢量A的X轴方向成分 A_x 的值 $A_x(t)$ 、以及Y轴方向成分 A_y 的值 $A_y(t)$ 与自旋极化度 $M_x(t)$ 的组合,且是自旋极化度 M_x 不同的3个以上的组合。

[0129] 而且,定义由将获取到的组合分别代入公式17而得到的3个以上的式子构成的连立方程式,并执行求解该连立方程式的规定的算术运算处理,从而作为测定对象物所产生的对象磁场B(B_x 、 B_y 、 B_z)来计算原磁场矢量C(C_x 、 C_y 、 C_z)。计算出的对象磁场矢量B(B_x 、 B_y 、 B_z)作为测定磁场数据55存储至存储部50。另外,基于从磁传感器10输出的信号得到的磁传感器测量值(平方差W-)作为磁传感器测量数据56被存储至存储部50。

[0130] 存储部50由ROM(Read Only Memory:只读存储器)、RAM(Random Access Memory:随机存取存储器)、硬盘等存储装置构成。存储部50存储用于处理部40统一地控制运算控制部30的程序、数据等,并且作为处理部40的作业区域来使用,暂时储存处理部40所执行的运算结果、来自操作部31的操作数据等。在本实施方式中,存储部50存储磁场测量程序51、人工磁场数据52、原磁场数据53、偏置磁场数据54、测定磁场数据55以及磁传感器测量数据56。

[0131] 原理

[0132] 对磁场测量装置1中的磁场的测量原理进行说明。图8是对没有磁场的情况下的对准进行说明的图。图9是对由磁场引起的对准的变化进行说明的图。图10以及图11是对由透过气室引起的直线偏振光的偏振面的变化进行说明的图。图12是表示对准方位角 θ 与探测光的检测结果的关系的图。

[0133] 应予说明,在以下的说明中,为了容易理解原理进行时间序列性地描述,但实际上(A)光泵浦以及(C)探测能够在本实施方式的单光束方式下同时产生。

[0134] (A) 光泵浦

[0135] 被装入气室12的碱金属原子的气体为照射被调整为与从D1线的超微小构造量子数F向F'($=F-1$)的状态的迁移相当的波长的泵浦光(在本实施方式中,为通过气室12的光),从而自旋大致朝向反平行(相反方向)的(自旋极化)原子大致相同数目地混合存在的集团。将该状态称为对准。此外,一个原子的自旋极化随着时间的经过缓和,但由于泵浦光是CW(continuous wave:连续波)光,所以自旋极化的形成和缓和同时并行且连续地重复,其结果为,若视为原子的集团整体则形成稳定的自旋极化。

[0136] 在测量区域5是零磁场的情况下,对准以原子的磁力矩的概率分布来表示。如本实

施方式那样在泵浦光是直线偏振光的情况下,如图8所示,其形状在X-Y平面中,为连结了沿着泵浦光的直线偏振光的电场的振动方向(在本实施方式中,是Y轴方向)延伸的两个椭圆而成的区域R的形状。

[0137] (B) 磁场的作用

[0138] 若在测量区域5存在一些磁场,则碱金属原子将该磁场矢量(气室12所受到的磁场)的方向作为旋转轴开始进动。而且,如图9所示,通过施加泵浦光的光泵浦作用、和气体原子与气室12的内壁碰撞等引起的缓和作用,对准的方向(椭圆的长径沿着的方向)变化为以原点O为中心旋转。

[0139] 对准的方向以相对于Y轴旋转了与磁场的强度对应的角度(θ)的配置成为稳定状态。在这里,将对准方向设为 θ_p ,将其正交方向设为 θ_s 。另外,将对准方向 θ_p 与作为泵浦光的电场的振动方向的Y轴方向所成的角 θ 设为对准方位角 θ 。该对准方位角 θ 主要根据Z轴方向的磁场强度而增加。

[0140] (C) 探测

[0141] 考虑具有在Y轴方向以电场矢量 E_0 振动的直线偏振光成分的探测光(在本实施方式中,为通过气室12的光)通过该状态的原子集团的状况。即,如图10所示,使探测光的电场的振动方向沿着Y轴方向的直线偏振光朝向+Z方向通过气室12。在图10中,原点O相当于原子集团(被装入气室12的气体原子)的位置,该原子集团被光泵浦,从而产生分布于沿着Y轴方向的区域的对准。在Z轴方向上,-Z方向侧表示透过原子集团之前的直线偏振光,+Z方向表示透过了原子集团的直线偏振光(透过光)。

[0142] 若直线偏振光透过原子集团,则由于线性二色性直线偏振光的偏振面旋转,该电场矢量变化为 E_1 。所谓线性二色性是在沿着对准的方向 θ_p (参照图9)、和与对准垂直的方向 θ_s (参照图9)上直线偏振光的透过率不同的性质。具体而言,由于与沿着对准的方向 θ_p 相比,与对准垂直的方向 θ_s 的成分被较多地吸收,所以探测光的偏振面以接近沿着对准的方向 θ_p 的方式旋转。

[0143] 图11是将直线偏振光透过原子集团的前后的偏振面的旋转的情况示于与作为探测光的照射方向的Z轴方向垂直的X-Y平面的图。在本实施方式中,入射至气室12的探测光是电场的振动方向为Y轴方向的电场矢量 E_0 的直线偏振光。通过对准,探测光中的方向 θ_p 的成分以透过率 t_p 透过,方向 θ_s 的成分以透过率 t_s 透过。由于线性二色性 $t_p > t_s$,所以透过气室12的探测光的偏振面以接近方向 θ_p 的方式旋转。这样通过气室12的光成为具有电场矢量 E_1 的光。

[0144] 具体地说,将电场矢量 E_0 的沿着对准的成分记作 E_{0p} ,将电场矢量 E_0 的沿着与对准和直线偏振光的行进方向垂直的方向的成分记作 E_{0s} 。另外,将电场矢量 E_1 的沿着对准的成分记作 E_{1p} ,将电场矢量 E_1 的沿着与对准和直线偏振光的行进方向垂直的方向的成分记作 E_{1s} 。在该情况下,成为 $E_{1p} = t_p E_{0p}$ 、和 $E_{1s} = t_s E_{0s}$ 的关系。

[0145] 若将沿着对准的方向与探测光的电场的振动方向所成的角(以下,称为“对准方位角”)设为 θ ,则根据上述关系,电场矢量 E_1 的方向 θ_p 以及方向 θ_s 的各成分通过以下的公式4来计算。

[0146] [式4]

$$[0147] \quad \vec{E}_1 = (0 \quad E_0) \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t_s & 0 \\ 0 & t_p \end{pmatrix} \cdots (4)$$

[0148] 如上所述,透过气室12的探测光通过偏振光分离器13而被分离为与作为探测光的照射方向的Y轴方向成+45度的 α 轴、以及与Y轴方向成-45度的 β 轴这两个偏振光成分。透过气室12的电场矢量 E_1 的直线偏振光的 α 轴方向成分 E_α 和 β 轴方向成分 E_β 通过公式5来计算。

[0149] [式5]

$$[0150] \quad (E_\alpha \quad E_\beta) = \vec{E}_1 \begin{pmatrix} \cos\left(-\frac{\pi}{4}-\theta\right) & \sin\left(-\frac{\pi}{4}-\theta\right) \\ -\sin\left(-\frac{\pi}{4}-\theta\right) & \cos\left(-\frac{\pi}{4}-\theta\right) \end{pmatrix} \cdots (5)$$

[0151] 光检测器14、15测量 α 轴和 β 轴两个偏振光成分各自的光强度,并将与受光光量对应的信号输出至运算控制部30。运算控制部30对来自光检测器14、15的信号进行处理,根据以下的公式6、公式7计算 α 轴以及 β 轴的各轴向的成分的平方和 W_+ 和平方差 W_- 。 E_α 表示 α 轴向的成分的光强度, E_β 表示 β 轴向的成分的光强度。

[0152] [式6]

$$[0153] \quad W_+ = E_\alpha^2 + E_\beta^2 \cdots (6)$$

[0154] [式7]

$$[0155] \quad W_- = E_\alpha^2 - E_\beta^2 \cdots (7)$$

[0156] 图12示有相对于对准方位角 θ 的、电场矢量 E_1 的直线偏振光的 α 轴以及 β 轴向成分 E_α 、 E_β ,以及各个的平方值 E_α^2 、 E_β^2 , α 轴以及 β 轴的各轴向的成分的平方和 W_+ 和平方差 W_- 。此外,所谓对准方位角 $\theta=0$ 是测量区域5为零磁场的状态(参照图8)。其中,方向 θ_p 的成分的透过率 $t_p=1$,方向 θ_s 的成分的透过率 $t_s=0.8$ 。

[0157] 在图12中,若着眼于平方差 W_- 的值,则平方差 W_- 相对于对准方位角 θ 以180度为周期振动。而且,由于平方差 W_- 在对准方位角 θ 从-45度到+45度的范围中,相对于对准方位角 θ 大致线性变化,所以得到较高的灵敏度。另外,由于该线性变化的中心是0度,其线性变化的范围比其他(平方和 W_+ 等)宽,所以对测量测量区域5所产生的磁场而言优选。由于心磁、脑磁等生物体磁场微弱,对准方位角 θ 较小,所以若使用平方差 W_- 则能够高灵敏度地观测偏振面的旋转角度。

[0158] 其中,如上所述,若在测量区域5存在与测量对象的磁场不同的不必要的磁场则受到其影响灵敏度降低,导致测量精度的降低。通常在测量心磁、脑磁等测量对象的磁场时,在通过磁屏蔽装置6抑制了向测量区域5的来自外部的磁场的侵入的环境下(外部磁场较小的状态)下进行,但通过磁屏蔽装置6将外部磁场充分地减少到对测定没有影响的程度很困难。换言之,不能够通过磁屏蔽装置6将外部磁场的侵入完全遮挡的情况较多。能够完全遮挡磁的磁屏蔽装置不仅大型,费用昂贵,并且设置成本、运用成本也较高。

[0159] 因此,在本实施方式中,在使用了磁屏蔽装置6的基础上,对漏入磁屏蔽装置6内的外部磁场(称为原磁场C)进行测量,并在通过磁场产生器8减少了该外部磁场的状态下对测量对象的磁场进行测量。其中,在原本外部磁场较低的情况下、外部磁场稳定的情况下,即使不使用磁屏蔽装置6也能够构成本实施方式。

[0160] 根据图12,在对准方位角 θ 从-45度到+45度的范围中,平方差W-与自旋极化度(M_x 、 M_y 、 M_z)的X轴方向成分 M_x (以下,记作自旋极化度 M_x)大致成比例。该自旋极化度 M_x 相当于作为合成了原子的磁力矩的磁化矢量的X轴方向成分的磁化值。因此,以下,将平方差W-作为自旋极化度 M_x 来处理。在本实施方式中,着眼于该自旋极化度 M_x ,导出表示自旋极化度 M_x 的值根据对气室12施加的磁场矢量B的各成分 B_x 、 B_y 、 B_z 如何变化的关系式。

[0161] 通过光泵浦产生的对准的自旋极化度(M_x 、 M_y 、 M_z)的时间发展用以下的公式8~公式10所示的布洛赫方程式(Bloch equations)来近似。 γ_F 表示由气室12内的介质气体(碱金属原子气体)的种类决定的磁旋转比。另外, Γ_0 表示自旋极化度(M_x 、 M_y 、 M_z)的缓和速度, Γ_p 表示光泵浦速度。 M_p 是碱金属原子集团的自旋全部汇聚到一个方向时的最大磁化。

[0162] [式8]

$$[0163] \quad \frac{dM_x}{dt} = \gamma_F (M_y B_z - M_z B_y) - \Gamma_0 M_x - \Gamma_p M_x \cdots (8)$$

[0164] [式9]

$$[0165] \quad \frac{dM_y}{dt} = \gamma_F (M_z B_x - M_x B_z) - \Gamma_0 M_y - \Gamma_p (M_p - M_y) \cdots (9)$$

[0166] [式10]

$$[0167] \quad \frac{dM_z}{dt} = \gamma_F (M_x B_y - M_y B_x) - \Gamma_0 M_z - \Gamma_p M_z \cdots (10)$$

[0168] 由于泵浦光以及探测光被稳定地以恒定的功率照射至气室12,所以自旋极化度(M_x 、 M_y 、 M_z)的稳态解能够在将上述公式8~公式10的左边分别置为零来解出。解通过公式11~公式13得到。

[0169] [式11]

$$[0170] \quad M_x = \frac{c}{a} \cdot \frac{B_x B_y + a B_z}{a^2 + B_x^2 + B_y^2 + B_z^2} \cdots (11)$$

[0171] [式12]

$$[0172] \quad M_y = \frac{c}{a} \cdot \frac{a^2 + B_y^2}{a^2 + B_x^2 + B_y^2 + B_z^2} \cdots (12)$$

[0173] [式13]

$$[0174] \quad M_z = \frac{c}{a} \cdot \frac{B_y B_z - a B_x}{a^2 + B_x^2 + B_y^2 + B_z^2} \cdots (13)$$

[0175] 在公式11~公式13中,a、c是常量,通过以下的公式14给出。

[0176] [式14]

$$[0177] \quad a = \frac{\Gamma_0 + \Gamma_p}{\gamma_F} \quad c = \Gamma_p M_p \cdots (14)$$

[0178] (D) 磁场的测量

[0179] 那么,考虑通过磁场产生器8(8X、8Y、8Z)对气室12在X、Y、Z轴方向分别产生/施加人工磁场A(A_x 、 A_y 、 A_z)的情况。在该情况下,磁传感器10所检测的磁场矢量B(B_x 、 B_y 、 B_z)如公

式15所示,为磁场产生器8所产生的人工磁场矢量A (A_x 、 A_y 、 A_z) 与原磁场矢量C (C_x 、 C_y 、 C_z) 的矢量和。所谓的原磁场C是在人工磁场A为零时存在于测量区域5的磁场。

[0180] [式15]

$$[0181] \quad \vec{B} = \vec{A} + \vec{C} \quad (B_x \quad B_y \quad B_z) = (A_x + C_x \quad A_y + C_y \quad A_z + C_z) \cdots (15)$$

[0182] 在这里,将人工磁场矢量A的Z轴方向成分 A_z 设为零 ($A_z = 0$)。另外,将人工磁场矢量A的X轴方向成分 A_x 设为具有振幅 A_{10} 的函数 $A_{10}f(t)$,将Y轴方向成分 A_y 设为具有振幅 A_{20} 的函数 $A_{20}g(t)$ 。因此,磁传感器10在测量区域5检测的磁场矢量B (B_x 、 B_y 、 B_z) 为以下的公式16。此外,振幅 A_{10} 和振幅 A_{20} 是具有磁场的维度的系数,函数 $f(t)$ 和函数 $g(t)$ 是非维度(无维)函数。

[0183] [式16]

$$[0184] \quad \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_x + A_{10}f(t) \\ C_y + A_{20}g(t) \\ C_z \end{pmatrix} \cdots (16)$$

[0185] 若将该公式16代入公式11的自旋极化度 M_x 代入,则得到公式17。

[0186] [式17]

$$[0187] \quad M_x = \frac{c}{a} \cdot \frac{C_x C_y + C_x A_{20}g(t) + C_y A_{10}f(t) + A_{10}f(t) A_{20}g(t) + a C_z}{a^2 + C_x^2 + C_y^2 + C_z^2 + 2C_x A_{10}f(t) + 2C_y A_{20}g(t) + A_{10}^2 f(t)^2 + A_{20}^2 g(t)^2} \cdots (17)$$

[0188] 此外,若 $A_{10} = A_{20} = A_0$ 则控制和计算很容易,上述公式成为以下的公式18。

[0189] [式18]

$$[0190] \quad \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_x + A_0 f(t) \\ C_y + A_0 g(t) \\ C_z \end{pmatrix} \cdots (18)$$

[0191] 若将该公式18代入公式11的自旋极化度 M_x ,则得到公式19。

[0192] [式19]

$$[0193] \quad M_x = \frac{c}{a} \cdot \frac{C_x C_y + C_x A_0 g(t) + C_y A_0 f(t) + A_0^2 f(t)g(t) + a C_z}{a^2 + C_x^2 + C_y^2 + C_z^2 + 2C_x A_0 f(t) + 2C_y A_0 g(t) + A_0^2 (f(t)^2 + g(t)^2)} \cdots (19)$$

[0194] 而且,使用公式19,以如下的方式计算作为未知数的原磁场矢量C的各成分 (C_x 、 C_y 、 C_z) 的3个值。即,进行使用了磁场测量装置1的测量,获取某一时刻t的、由磁场产生器8产生的人工磁场A的X轴方向成分 $A_x(t)$ 、以及Y轴方向成分 $A_y(t)$ 与自旋极化度 $M_x(t)$ (即,磁传感器10的输出值W-) 的组合,且是自旋极化度 $M_x(t)$ 不同的3以上的组合。

[0195] 而且,按每一个组合来生成由将人工磁场 $A_x(t)$ 、 $A_y(t)$ 、以及自旋极化度 $M_x(t)$ 代入公式19所得到的3个式子构成的连立方程式。通过求解该连立方程式,能够计算作为未知数的原磁场矢量C的各成分 (C_x 、 C_y 、 C_z)。

[0196] 此外,在公式19中,常量a、c也可以为未知数。即,公式19中包含原磁场矢量C的各成分 (C_x 、 C_y 、 C_z)、以及常量a、c这5个未知数。在该情况下,进行使用了磁场测量装置1的测量,获取某一时刻t的人工磁场 $A_x(t)$ 、 $A_y(t)$ 与自旋极化度 $M_x(t)$ 的组合,且是自旋极化度 $M_x(t)$ 不同的5个组合。而且,按每一个组合来生成由将各值代入公式19所得的5个式子构成的

连立方程式。通过求解该连立方程式,能够计算作为未知数的原磁场矢量C的各成分(C_x 、 C_y 、 C_z)、以及常量a、c。

[0197] 而且,获取人工磁场 $A_x(t)$ 、 $A_y(t)$ 与自旋极化度 $M_x(t)$ 的组合,且是自旋极化度 $M_x(t)$ 不同的6个以上的组合,也可以实施公式19的拟合。具体而言,以使用公式19计算出的自旋极化度 M_x 、和作为磁传感器10的测量值的 M_x 的偏差成为最小的方式,来计算作为未知数的原磁场矢量C的各成分(C_x 、 C_y 、 C_z)、以及常量a、c。

[0198] 另外,若将作为人工磁场 A_x 、 A_y 的时间函数 $f(t)$ 、 $g(t)$ 的振幅 A_0 与原磁场C的X轴方向成分 C_x 、以及Y轴方向成分 C_y 相比设为充分小(大体是1/10以下。 $A_0 < (C_x/10)$ 、 $A_0 < (C_y/10)$),公式19被简化为公式20,测量变得更加容易。

[0199] [式20]

$$[0200] \quad M_x = \frac{c}{a} \cdot \frac{C_x C_y + C_x A_0 g(t) + C_y A_0 f(t) + a C_z}{a^2 + C_x^2 + C_y^2 + C_z^2 + 2 C_x A_0 f(t) + 2 C_y A_0 g(t)} \quad \dots (20)$$

[0201] 这样,能够使用公式19、公式20,根据由磁场产生器8产生的人工磁场A(A_x 、 A_y 、 A_z)以及此时的自旋极化度 M_x (即,平方差W-),计算原磁场矢量C(C_x 、 C_y 、 C_z)。

[0202] (E) 人工磁场A

[0203] 以如下的方式确定人工磁场A(A_x 、 A_y 、 A_z)。即,人工磁场A的X轴方向成分 A_x 的时间函数 $f(t)$ 取作为分别不同的n个能级的固定值 f_i ($i=1, \dots, n$),人工磁场A的Y轴方向成分 A_y 的时间函数 $g(t)$ 取作为分别不同的m个能级的固定值 g_j ($j=1, \dots, m$)。伴随于此,以存在与时间函数 $g(t)$ 、 $f(t)$ 各个固定值 f_i 、 g_j 的全部的组合对应的合计 $n \times m$ 个测量期间 τ_k ($k=i, \dots, n \times m$)的方式,确定时间函数 $f(t)$ 、 $g(t)$ 。

[0204] 在本实施方式中,如上述那样,为了计算原磁场矢量C的各成分(C_x 、 C_y 、 C_z),需要获取某一时刻t的人工磁场 $A_x(t)$ 、 $A_y(t)$ 与自旋极化度 $M_x(t)$ 的组合,且是自旋极化度 $M_x(t)$ 不同的3个以上的组合。即,需要以存在3个以上的测量期间 τ_k ($k \geq 3$)的方式,确定时间函数 $f(t)$ 、 $g(t)$ 分别所取的固定值 f_i 、 g_j 。

[0205] 而且,与人工磁场 A_x 、 A_y 各自的时间函数 $f(t)$ 、 $g(t)$ 的固定值 f_i 、 g_j 的组合对应的测量期间 τ_k 的自旋极化度 M_x 分别从公式19、公式20变为以下的公式21、公式22。此外,这里将 $f(t) = f_i$ 、 $g(t) = g_j$ 时的自旋极化度 $M_x(t)$ 记作 M_{xij} 。

[0206] [式21]

$$[0207] \quad M_{xij} = \frac{c}{a} \cdot \frac{C_x C_y + C_x A_{20} g_j + C_y A_{10} f_i + A_{10} f_i A_{20} g_j + a C_z}{a^2 + C_x^2 + C_y^2 + C_z^2 + 2 C_x A_{10} f_i + 2 C_y A_{20} g_j + (A_{10} f_i)^2 + (A_{20} g_j)^2} \quad \dots (21)$$

[0208] [式22]

$$[0209] \quad M_{xij} = \frac{c}{a} \cdot \frac{C_x C_y + C_x A_{20} g_j + C_y A_{10} f_i + a C_z}{a^2 + C_x^2 + C_y^2 + C_z^2 + 2 C_x A_{10} f_i + 2 C_y A_{20} g_j} \quad \dots (22)$$

[0210] 由于未知数是 C_x 、 C_y 、 C_z 这三个,所以测量三个以上的 M_{xij} 。因此,在使X侧和Y侧这两者变化时,n是2以上的整数,m是2以上的整数,合计测量四个以上的 M_{xij} 。在仅使X侧变化时,n是3以上的整数,测量三个以上的 M_{xij} 。在仅使Y侧变化时,m是3以上的整数,测量三个以上的 M_{xij} 。

[0211] 在系数a和c均为未知数的情况下,未知数变为5个,所以测量三个以上的 M_{xij} 。因

此,在使X侧和Y侧这两者变化时,n或者m的一方是2以上的整数,n或者m的另一方是3以上的整数,合计测量6个以上的 M_{xij} 。在仅使X侧变化时,n是5以上的整数,测量5个以上的 M_{xij} 。在仅使Y侧变化时,m是5以上的整数,测量5个以上的 M_{xij} 。

[0212] 此外,与之前相同,若 $A_{10}=A_{20}=A_0$ 则控制和计算变得容易,公式21、公式22分别成为以下公式23、公式24。

[0213] [式23]

$$[0214] \quad M_{xij} = \frac{c}{a} \cdot \frac{C_x C_y + C_x A_0 g_j + C_y A_0 f_i + A_0 f_i A_0 g_j + a C_z}{a^2 + C_x^2 + C_y^2 + C_z^2 + 2C_x A_0 f_i + 2C_y A_0 g_j + (A_0 f_i)^2 + (A_0 g_j)^2} \quad \dots (23)$$

[0215] [式24]

$$[0216] \quad M_{xij} = \frac{c}{a} \cdot \frac{C_x C_y + C_x A_0 g_j + C_y A_0 f_i + a C_z}{a^2 + C_x^2 + C_y^2 + C_z^2 + 2C_x A_0 f_i + 2C_y A_0 g_j} \quad \dots (24)$$

[0217] 处理的流程

[0218] 图13以及图14是对本实施方式所涉及的磁场测量处理的流程进行说明的流程图。该处理是通过图7所示的处理部40的各部执行磁场测量程序51来实现的处理。另外,以将测定对象物设为人体(被检体9),测定心磁(由心脏的电生理学的活动产生的磁场)、脑磁的情况为例进行说明。

[0219] 如图13所示,首先,照射控制部41使光源18开始包含兼具泵浦光以及探测光的直线偏振光成分的照射光的照射(步骤S01)。接着,测定原磁场C。具体而言,磁场产生控制部42使磁场产生器8产生与对象的组合(i、j)对应的人工磁场A($A_x=A_0 f_i$ 、 $A_y=A_0 g_j$ 、0)(步骤S02)。而且,在该状态下获取基于从磁传感器10输出的信号得到的测量值(平方差W-)(步骤S03)。

[0220] 以作为人工磁场的X轴方向成分 A_x 的时间函数 $f(t)$ 的固定值 f 的数 i ($i=1 \sim n$)与作为Y轴方向成分 A_y 的时间函数 $g(t)$ 的固定值 g 的数 j ($j=1 \sim m$)的组的每一个为对象重复执行步骤S02以及步骤S03的处理(步骤S04)。即,在针对(i、j)的全部组合未结束的情况下(步骤S04:否),将未执行处理的(i、j)的组作为对象执行步骤S02以及步骤S03的处理。

[0221] 若针对(i、j)的全部的组合步骤S02以及步骤S03的处理结束(步骤S04:是),原磁场计算部43使用人工磁场 A_x 、 A_y 以及获取到的测量值(平方差W-)的组合,计算原磁场矢量C(C_x 、 C_y 、 C_z)(步骤S05)。接着,偏置磁场决定部44决定消除计算出的原磁场C的偏置磁场 B_b (步骤S06)。

[0222] 接下来,如图14所示,使测定对象物接近磁传感器10来配置(步骤S07)。而且,对该测定对象物所产生的磁场B进行测定。具体而言,磁场产生控制部42使磁场产生器8产生与对象的组合(i、j)对应的人工磁场A($A_x=A_0 f_i$ 、 $A_y=A_0 g_j$ 、0)与偏置磁场 B_b 的合成磁场(步骤S08)。而且,在该状态下获取基于从磁传感器10输出的信号得到的测量值(平方差W-)(步骤S09)。

[0223] 以作为人工磁场的X轴方向成分 A_x 的时间函数 $f(t)$ 的固定值 f 的数 i ($i=1 \sim n$)与作为Y轴方向成分 A_y 的时间函数 $g(t)$ 的固定值 g 的数 j ($j=1 \sim m$)的组每一个为对象反复执行步骤S08以及步骤S09的处理(步骤S10)。即,在对(i、j)的全部的组合未结束的情况下(步骤S10:否),以未执行处理(i、j)的组为对象执行步骤S08以及步骤S09的处理。

[0224] 若对(i、j)的所有的组合,结束步骤S08以及步骤S09的处理(步骤S10:是),则对象磁场计算部45使用人工磁场 A_x 、 A_y 与获取到的测量值(平方差 W -)的组合,来计算测定对象物所产生的磁场 $B(B_x, B_y, B_z)$ (步骤S11)。然后,照射控制部41使光源18的照射光的照射结束(步骤S12)。若进行以上的处理,则处理部40结束磁测量处理。

[0225] 作为以这样的方式构成的磁场测量装置1的具体的实施例,以下,对具体地示出了人工磁场 $A(A_x, A_y, A_z)$ 的3个实施例进行说明。

[0226] 第一实施例

[0227] 第一实施例是作为人工磁场 A 的 X 轴方向成分 A_x 的时间函数 $f(t)$ 取两个固定值 f_1 、 f_2 的实施例(与应用例9对应)。在第一实施例中,这两个固定值 f_1 、 f_2 中至少一个为零,并且作为 Y 轴方向成分 A_y 的时间函数 $g(t)$ 取两个固定值 g_1 、 g_2 ,这两个固定值 g_1 、 g_2 中至少一个为零。

[0228] 图15是表示第一实施例中的人工磁场 A_x 、 A_y 、以及自旋极化度 M_x 的一个例子的图表。在该图中,将横轴作为共用的时刻 t ,从上向下依次示有人工磁场 A_x 、 A_y 、以及自旋极化度 M_x 的图表。

[0229] 时间函数 $f(t)$ 取 $f_1=0$ 、 $f_2=1$ 作为固定值 f_i ,时间函数 $g(t)$ 取 $g_1=0$ 、 $g_2=1$ 作为固定值 g_j 。因此,人工磁场 A 的 X 轴方向成分 A_x 取作为 X 侧第一能级的恒定磁场的“ $A_0f_1=0$ ”、和作为 X 侧第二能级的恒定磁场的“ $A_0f_2=A_0$ ”这二个值。 Y 轴方向成分 A_y 取作为 Y 侧第一能级的恒定磁场的“ $A_0g_1=0$ ”、和作为 Y 侧第二能级的恒定磁场的“ $A_0g_2=A_0$ ”这二个值。

[0230] 而且,存在与时间函数 $f(t)$ 的固定值 f_1 、 f_2 以及时间函数 $g(t)$ 的固定值 g_1 、 g_2 的所有的组合对应的4个测量期间 $\tau_1 \sim \tau_4$ 。每个测量期间 $\tau_1 \sim \tau_4$ 的自旋极化度 $M_{x1} \sim M_{x4}$ 各不相同。即,能够获取使用了公式19的原磁场矢量 $C(C_x, C_y, C_z)$ 的计算所需要的作为人工磁场 A 的 X 轴方向成分 A_x 的 X 侧第 i 能级($i=1, 2$)的恒定磁场、作为 Y 轴方向成分 A_y 的 Y 侧第 j 能级($j=1, 2$)的恒定磁场、以及作为磁化值的自旋极化度 M_x 的组合,且是自旋极化度 M_x 不同的三个以上的组合。

[0231] 具体而言,在 $i=j=1$ 的第一测量期间 τ_1 中,时间函数 $f(\tau_1)=f_1=0$ 、 $g(\tau_1)=g_1=0$ 。即,作为人工磁场 A 的 X 轴方向成分 A_x 产生 X 侧第一能级的恒定磁场,作为 Y 轴方向成分 A_y 产生 Y 侧第一能级的恒定磁场。因此,对气室12施加的磁场 B 的公式16成为以下的公式25。

[0232] [式25]

$$[0233] \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_x \\ C_y \\ C_z \end{pmatrix} \cdots (25)$$

[0234] 而且,作为第1-1的磁化值的自旋极化度 M_x 的公式23成为以下的公式26。

[0235] [式26]

$$[0236] M_{x1} = \frac{c}{a} \cdot \frac{C_x C_y + a C_z}{a^2 + C_x^2 + C_y^2 + C_z^2} \cdots (26)$$

[0237] 另外,在 $i=2$ 、 $j=1$ 的第二测量期间 τ_2 中,时间函数 $f(\tau_2)=f_2=1$ 、 $g(\tau_2)=g_1=0$ 。即,作为人工磁场 A 的 X 轴方向成分 A_x 产生 X 侧第二能级的恒定磁场,作为 Y 轴方向成分 A_y 产生 Y 侧第一能级的恒定磁场。因此,对气室12施加的磁场 B 的公式16成为以下的公式27。

[0238] [式27]

$$[0239] \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_x + A_0 \\ C_y \\ C_z \end{pmatrix} \cdots (27)$$

[0240] 而且,作为第2-1的磁化值的自旋极化度 M_x 的公式23成为以下的公式28。

[0241] [式28]

$$[0242] M_{x2} = \frac{c}{a} \cdot \frac{C_x C_y + C_y A_0 + a C_z}{a^2 + C_x^2 + C_y^2 + C_z^2 + 2C_x A_0 + A_0^2} \cdots (28)$$

[0243] 另外,在 $i=1$ 、 $j=2$ 的第三测量期间 τ_3 中,时间函数 $f(\tau_3) = f_1 = 0$ 、 $g(\tau_3) = g_2 = 1$ 。即,作为人工磁场A的X轴方向成分 A_x 产生X侧第一能级的恒定磁场,作为Y轴方向成分 A_y 产生Y侧第二能级的恒定磁场。因此,对气室12施加的磁场B的公式16成为以下的公式29。

[0244] [式29]

$$[0245] \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_x \\ C_y + A_0 \\ C_z \end{pmatrix} \cdots (29)$$

[0246] 而且,作为第1-2的磁化值的自旋极化度 M_x 的公式23成为以下的公式30。

[0247] [式30]

$$[0248] M_{x3} = \frac{c}{a} \cdot \frac{C_x C_y + C_x A_0 + a C_z}{a^2 + C_x^2 + C_y^2 + C_z^2 + 2C_y A_0 + A_0^2} \cdots (30)$$

[0249] 另外,在作为 $i=j=2$ 的第四测量期间 τ_4 中,时间函数 $f(\tau_4) = f_2 = 1$ 、 $g(\tau_4) = g_2 = 1$ 。即,作为人工磁场A的X轴方向成分 A_x 产生X侧第二能级的恒定磁场,作为Y轴方向成分 A_y 产生Y侧第二能级的恒定磁场。因此,对气室12施加的磁场B的公式16变为以下的公式31。

[0250] [式31]

$$[0251] \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_x + A_0 \\ C_y + A_0 \\ C_z \end{pmatrix} \cdots (31)$$

[0252] 而且,作为第2-2的磁化值的自旋极化度 M_x 的公式23成为以下的公式32。

[0253] [式32]

$$[0254] M_{x4} = \frac{c}{a} \cdot \frac{C_x C_y + C_x A_0 + C_y A_0 + A_0^2 + a C_z}{a^2 + C_x^2 + C_y^2 + C_z^2 + 2C_x A_0 + 2C_y A_0 + 2A_0^2} \cdots (32)$$

[0255] 将在第一测量期间 τ_1 由磁场测量装置1得到的磁化值(M_{x1})代入公式26的左边得到第一方程式。将在第二测量期间 τ_2 由磁场测量装置1得到的磁化值(M_{x2})代入公式28的左边得到第二方程式。将在第三测量期间 τ_3 由磁场测量装置1得到的磁化值(M_{x3})代入公式30的左边得到第三方程式。将在第四测量期间 τ_4 由磁场测量装置1得到的磁化值(M_{x4})代入公式32的左边得到第四方程式。而且,使这4个方程式连立,计算未知数即原磁场矢量C(C_x 、 C_y 、 C_z)。

[0256] 第二实施例

[0257] 第二实施例是作为人工磁场A的X轴方向成分 A_x 的时间函数 $f(t)$ 取3个固定值 f_1 、 f_2 、 f_3 的实施例。在第二实施例中,这3个固定值 f_1 、 f_2 、 f_3 中至少一个为零,并且作为Y轴方向成分 A_y 的时间函数 $g(t)$ 取3个固定值 g_1 、 g_2 、 g_3 ,这3个固定值 g_1 、 g_2 、 g_3 中至少一个为零。

[0258] 图16是表示第二实施例中的人工磁场 A_x 、 A_y 、以及自旋极化度 M_x 的一个例子的图表。该图将横轴为时刻 t ,示有人工磁场 A_x 、 A_y 、以及自旋极化度 M_x 的图表。另外,为了容易理解自旋极化度 M_x 的变化,将上面的图表的一部分对纵轴方向进行放大来表示的图是下面的图。

[0259] 时间函数 $f(t)$ 取 $f_1=0$ 、 $f_2=1$ 、 $f_3=-1$ 作为固定值 f_i ,时间函数 $g(t)$ 取 $g_1=0$ 、 $g_2=1$ 、 $g_3=-1$ 作为固定值 g_j 。因此,人工磁场 A_x 、 A_y 均取三值(0、 A_0 、 $-A_0$)。而且,存在与时间函数 $f(t)$ 的固定值 $f_1 \sim f_3$ 、以及时间函数 $g(t)$ 的固定值 $g_1 \sim g_3$ 的全部的组合对应的9个测量期间 $\tau_1 \sim \tau_9$ 。

[0260] 每个测量期间 $\tau_1 \sim \tau_9$ 中的自旋极化度 $M_{x1} \sim M_{x9}$ 各不相同。即,能够获取使用了公式19的原磁场矢量 $C(C_x, C_y, C_z)$ 的计算所需要的人工磁场 A_x 、 A_y 与自旋极化度 M_x 的组合,且是自旋极化度 M_x 不同的三个以上的组合。

[0261] 具体而言,在 $i=j=1$ 的第一测量期间 τ_1 中,时间函数 $f(\tau_1)=f_1=0$ 、 $g(\tau_1)=g_1=0$ 。因此,对气室12施加的磁场B的公式16成为以下的公式33。

[0262] [式33]

$$[0263] \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_x \\ C_y \\ C_z \end{pmatrix} \cdots (33)$$

[0264] 而且,自旋极化度 M_x 的公式23成为以下的公式34。

[0265] [式34]

$$[0266] M_{x1} = \frac{c}{a} \cdot \frac{C_x C_y + a C_z}{a^2 + C_x^2 + C_y^2 + C_z^2} \cdots (34)$$

[0267] 另外,在 $i=2$ 、 $j=1$ 第二测量期间 τ_2 中,时间函数 $f(\tau_2)=f_2=1$ 、 $g(\tau_2)=g_1=0$ 。因此,对气室12施加的磁场B的公式16成为以下的公式35。

[0268] [式35]

$$[0269] \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_x + A_0 \\ C_y \\ C_z \end{pmatrix} \cdots (35)$$

[0270] 而且,自旋极化度 M_x 的公式23成为以下的公式36。

[0271] [式36]

$$[0272] M_{x2} = \frac{c}{a} \cdot \frac{C_x C_y + C_y A_0 + a C_z}{a^2 + C_x^2 + C_y^2 + C_z^2 + 2 C_x A_0 + A_0^2} \cdots (36)$$

[0273] 另外,在 $i=3$ 、 $j=1$ 的第三测量期间 τ_3 中,时间函数 $f(\tau_3)=f_3=-1$ 、 $g(\tau_3)=g_1=0$ 。因此,对气室12施加的磁场B的公式16变为以下的公式37。

[0274] [式37]

$$[0275] \quad \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_x - A_0 \\ C_y \\ C_z \end{pmatrix} \cdots (37)$$

[0276] 而且,自旋极化度 M_x 的公式23变为以下的公式38。

[0277] [式38]

$$[0278] \quad M_{x3} = \frac{c}{a} \cdot \frac{C_x C_y - C_y A_0 + a C_z}{a^2 + C_x^2 + C_y^2 + C_z^2 - 2C_x A_0 + A_0^2} \cdots (38)$$

[0279] 另外,在 $i=1$ 、 $j=2$ 的第四测量期间 τ_4 中,时间函数 $f(\tau_4) = f_1 = 0$ 、 $g(\tau_4) = g_2 = 1$ 。因此,对气室12施加的磁场 B 的公式16成为以下的公式39。

[0280] [式39]

$$[0281] \quad \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_x \\ C_y + A_0 \\ C_z \end{pmatrix} \cdots (39)$$

[0282] 而且,自旋极化度 M_x 的公式23成为以下的公式40。

[0283] [式40]

$$[0284] \quad M_{x4} = \frac{c}{a} \cdot \frac{C_x C_y + C_x A_0 + a C_z}{a^2 + C_x^2 + C_y^2 + C_z^2 + 2C_x A_0 + A_0^2} \cdots (40)$$

[0285] 另外,在 $i=j=2$ 的第五测量期间 τ_5 中,时间函数 $f(\tau_5) = f_2 = 1$ 、 $g(\tau_5) = g_2 = 1$ 。因此,对气室12施加的磁场 B 的公式16成为以下的公式41。

[0286] [式41]

$$[0287] \quad \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_x + A_0 \\ C_y + A_0 \\ C_z \end{pmatrix} \cdots (41)$$

[0288] 而且,自旋极化度 M_x 的公式23成为以下的公式42。

[0289] [式42]

$$[0290] \quad M_{x5} = \frac{c}{a} \cdot \frac{C_x C_y + C_x A_0 + C_y A_0 + A_0^2 + a C_z}{a^2 + C_x^2 + C_y^2 + C_z^2 + 2C_x A_0 + 2C_y A_0 + 2A_0^2} \cdots (42)$$

[0291] 另外,在 $i=3$ 、 $j=2$ 的第六测量期间 τ_6 中,时间函数 $f(\tau_6) = f_3 = -1$ 、 $g(\tau_6) = g_2 = 1$ 。因此,对气室12施加的磁场 B 的公式16成为以下的公式43。

[0292] [式43]

$$[0293] \quad \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_x - A_0 \\ C_y + A_0 \\ C_z \end{pmatrix} \cdots (43)$$

[0294] 而且,自旋极化度 M_x 的公式23成为以下的公式44。

[0295] [式44]

$$[0296] \quad M_{x6} = \frac{c}{a} \cdot \frac{C_x C_y + C_x A_0 - C_y A_0 - A_0^2 + a C_z}{a^2 + C_x^2 + C_y^2 + C_z^2 - 2C_x A_0 + 2C_y A_0 + 2A_0^2} \cdots (44)$$

[0297] 另外,在*i*=1、*j*=3的第七测量期间τ₇中,时间函数*f*(τ₇)=*f*₁=0、*g*(τ₇)=*g*₃=-1。因此,对气室12施加的磁场*B*的公式16成为以下的公式45。

[0298] [式45]

$$[0299] \quad \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_x \\ C_y - A_0 \\ C_z \end{pmatrix} \cdots (45)$$

[0300] 而且,自旋极化度*M_x*的公式23成为以下的公式46。

[0301] [式46]

$$[0302] \quad M_{x6} = \frac{c}{a} \cdot \frac{C_x C_y - C_x A_0 + a C_z}{a^2 + C_x^2 + C_y^2 + C_z^2 - 2C_y A_0 + 2A_0^2} \cdots (46)$$

[0303] 另外,在作为*i*=2、*j*=3的第八测量期间τ₈中,时间函数*f*(τ₈)=*f*₂=1、*g*(τ₈)=*g*₃=-1。因此,对气室12施加的磁场*B*的公式16成为以下的公式47。

[0304] [式47]

$$[0305] \quad \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_x + A_0 \\ C_y - A_0 \\ C_z \end{pmatrix} \cdots (47)$$

[0306] 而且,自旋极化度*M_x*的公式23成为以下的公式48。

[0307] [式48]

$$[0308] \quad M_{x8} = \frac{c}{a} \cdot \frac{C_x C_y - C_x A_0 + C_y A_0 - A_0^2 + a C_z}{a^2 + C_x^2 + C_y^2 + C_z^2 + 2C_x A_0 - 2C_y A_0 + 2A_0^2} \cdots (48)$$

[0309] 另外,在*i*=*j*=3的第九的测量期间τ₉中,时间函数*f*(τ₉)=*f*₃=-1、*g*(τ₉)=*g*₃=-1。因此,对气室12施加的磁场*B*的公式16成为以下的公式49。

[0310] [式49]

$$[0311] \quad \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_x - A_0 \\ C_y - A_0 \\ C_z \end{pmatrix} \cdots (49)$$

[0312] 而且,自旋极化度*M_x*的公式23成为以下的公式50。

[0313] [式50]

$$[0314] \quad M_{x9} = \frac{c}{a} \cdot \frac{C_x C_y - C_x A_0 - C_y A_0 + A_0^2 + a C_z}{a^2 + C_x^2 + C_y^2 + C_z^2 - 2C_x A_0 - 2C_y A_0 + 2A_0^2} \cdots (50)$$

[0315] 将在第一测量期间τ₁由磁场测量装置1得到的磁化值 (*M_{x1}*) 代入公式34的左边得到第一方程式。将在第二测量期间τ₂由磁场测量装置1得到的磁化值 (*M_{x2}*) 代入公式36的左边得到第二方程式。将在第三测量期间τ₃由磁场测量装置1得到的磁化值 (*M_{x3}*) 代入公式38的左边得到第三方程式。

[0316] 将在第四测量期间 τ_4 由磁场测量装置1得到的磁化值(M_{x4})代入公式40的左边得到第四方程式。将在第五测量期间 τ_5 由磁场测量装置1得到的磁化值(M_{x5})代入公式42的左边得到第五方程式。将在第六期间 τ_6 由磁场测量装置1得到的磁化值(M_{x6})代入公式44的左边得到第六方程式。

[0317] 将在第七测量期间 τ_7 由磁场测量装置1得到的磁化值(M_{x7})代入公式46的左边得到第七方程式。将在第八测量期间 τ_8 由磁场测量装置1得到的磁化值(M_{x8})代入公式48的左边得到第八方程式。将在第九测量期间 τ_9 由磁场测量装置1得到的磁化值(M_{x9})代入公式50的左边得到第九方程式。而且,使这9个方程式连立,计算未知数即原磁场矢量C(C_x 、 C_y 、 C_z)。

[0318] 第三实施例

[0319] 第三实施例中仅产生/施加一个轴向成分(X轴方向成分)的实施例(与应用例2对应)作为人工磁场A。即,在自旋极化度 M_x 的公式17中,与 $g(t)=0$ 的情况相当。另外,作为人工磁场A的X轴方向成分 A_x 的时间函数 $f(t)$ 取3个固定值 f_1 、 f_2 、 f_3 ,这3个固定值 f_1 、 f_2 、 f_3 中的一个为零。

[0320] 即,例如,人工磁场A的X轴方向成分 A_x 取作为X侧第一能级的恒定磁场的“ $A_0 f_1=0$ ”、作为X侧第二能级的恒定磁场的“ $A_0 f_2=A_0$ ”、以及作为X侧第三能级的恒定磁场的“ $A_0 f_3=-A_0$ ”这三个值。因此,自旋极化度 M_x 的公式21、公式22分别成为以下的公式51、公式52。

[0321] [式51]

$$[0322] \quad M_{xi} = \frac{c}{a} \cdot \frac{C_x C_y + C_y A_{10} f_i + a C_z}{a^2 + C_x^2 + C_y^2 + C_z^2 + 2 C_x A_{10} f_i + (A_{10} f_i)^2} \cdots (51)$$

[0323] [式52]

$$[0324] \quad M_{xi} = \frac{c}{a} \cdot \frac{C_x C_y + C_y A_{10} f_i + a C_z}{a^2 + C_x^2 + C_y^2 + C_z^2 + 2 C_x A_{10} f_i} \cdots (52)$$

[0325] 在该情况下,存在分别与人工磁场A的固定值 $f_1 \sim f_3$ 对应的3个测量期间 $\tau_1 \sim \tau_3$ 。例如,时间函数 $f(t)$ 作为固定值 f_i ,取 $f_1=0$ 、 $f_2=1$ 、 $f_3=-1$ 。于是,上述3个测量期间 $\tau_1 \sim \tau_3$ 与上述实施例2的测量期间 $\tau_1 \sim \tau_3$ 相同。

[0326] 即,在 $i=1$ 、 $j=1$ ($g_1=0$)的第一测量期间 τ_1 中,作为人工磁场A的X轴方向成分 A_x 产生X侧第一能级的恒定磁场。而且,对气室12施加的磁场B是公式33,作为第1-1的磁化值的自旋极化度 M_x 是公式34。

[0327] 另外,在 $i=2$ 、 $j=1$ ($g_1=0$)的第二测量期间 τ_2 中,作为人工磁场A的X轴方向成分 A_x 产生X侧第二能级的恒定磁场。而且,对气室12施加的磁场B是公式35,作为第2-1的磁化值的自旋极化度 M_x 是公式36。

[0328] 另外,在 $i=3$ 、 $j=1$ ($g_1=0$)的第三测量期间 τ_3 中,作为人工磁场A的X轴方向成分 A_x 产生X侧第三能级的恒定磁场。而且,对气室12施加的磁场B是公式37,作为第3-1的磁化值的自旋极化度 M_x 是公式38。

[0329] 像这样,每个测量期间 $\tau_1 \sim \tau_3$ 的自旋极化度 M_x 各不相同。因此,能够获取使用了公式17的原磁场矢量C(C_x 、 C_y 、 C_z)的计算所需要的人工磁场 A_x 、 A_y 与自旋极化度 M_x 的组合,且是自旋极化度 M_x 不同的三个以上的组合。

[0330] 第四实施例

[0331] 第四实施例中产生/施加一个轴向成分(Y轴方向成分)的实施例(与应用例6对应)作为人工磁场A。即,在自旋极化度 M_x 的公式17中,与 $f(t)=0$ 的情况相当。另外,作为人工磁场A的Y轴方向成分 A_y 的时间函数 $g(t)$ 取3个固定值 g_1 、 g_2 、 g_3 ,这3个固定值 g_1 、 g_2 、 g_3 中的一个为零。

[0332] 即,例如,人工磁场A的Y轴方向成分 A_y 取作为Y侧第一能级的恒定磁场的“ $A_{0g1}=0$ ”、作为Y侧第二能级的恒定磁场的“ $A_{0g2}=A_0$ ”、以及作为Y侧第三能级的恒定磁场的“ $A_{0g3}=-A_0$ ”这三个值。因此,自旋极化度 M_x 的公式21、公式22分别变为以下的公式53、公式54。

[0333] [式53]

$$[0334] \quad M_{xj} = \frac{c}{a} \cdot \frac{C_x C_y + C_x A_{20} g_j + a C_z}{a^2 + C_x^2 + C_y^2 + C_z^2 + 2 C_y A_{20} g_j + (A_{20} g_j)^2} \cdots (53)$$

[0335] [式54]

$$[0336] \quad M_{xj} = \frac{c}{a} \cdot \frac{C_x C_y + C_x A_{20} g_j + a C_z}{a^2 + C_x^2 + C_y^2 + C_z^2 + 2 C_y A_{20} g_j} \cdots (54)$$

[0337] 在该情况下,存在分别与人工磁场A的固定值 $g_1 \sim g_3$ 对应的3个测量期间 $\tau_1 \sim \tau_3$ 。例如,时间函数 $g(t)$ 作为固定值 g_j ,取 $g_1=0$ 、 $g_2=1$ 、 $g_3=-1$ 。于是,上述3个测量期间 $\tau_1 \sim \tau_3$ 与上述实施例2的测量期间 $\tau_1 \sim \tau_3$ 相同。

[0338] 即,在 $i=1$ ($f_1=0$)、 $j=1$ 的第一测量期间 τ_1 中,作为人工磁场A的Y轴方向成分 A_y 产生Y侧第一能级的恒定磁场。而且,对气室12施加的磁场B是公式33,作为第1-1的磁化值的自旋极化度 M_x 是公式34。

[0339] 另外,在 $i=1$ ($f_1=0$)、 $j=2$ 的第二测量期间 τ_2 中,作为人工磁场A的Y轴方向成分 A_y 产生Y侧第二能级的恒定磁场。而且,对气室12施加的磁场B是公式39,作为第1-2的磁化值的自旋极化度 M_x 是公式40。

[0340] 另外,在 $i=1$ ($f_1=0$)、 $j=3$ 的第三测量期间 τ_3 中,作为人工磁场A的Y轴方向成分 A_y 产生Y侧第三能级的恒定磁场。而且,对气室12施加的磁场B是公式45,作为第1-3的磁化值的自旋极化度 M_x 是公式46。

[0341] 像这样,每个测量期间 $\tau_1 \sim \tau_3$ 的自旋极化度 M_x 各不相同。因此,能够获取使用了公式17的原磁场矢量 C (C_x 、 C_y 、 C_z) 的计算所需要的人工磁场 A_x 、 A_y 与自旋极化度 M_x 的组合,且是自旋极化度 M_x 不同的三个以上的组合。

[0342] 第五实施例

[0343] 第五实施例是将未放置测定对象物的状态的测量区域5不是像上述实施例那样设为零磁场,而是在测量区域5创建规定的磁场的情况的实施例。将欲在未放置测定对象物的状态的测量区域5创建的磁场称为靶磁场。在将靶磁场不设为零磁场而是欲设为规定的磁场的情况下,在获取了在图13所示的步骤S03中基于从磁传感器10输出的信号得到的测量值(平方差 W) 与此时刻的人工磁场 A_x 、 A_y 的值的组合后,进行以下的处理。

[0344] 作为第一工序,使用获取到的测量值(平方差 W) 与人工磁场 A_x 、 A_y 的组合,作为原磁场 C 计算测量区域5的磁场(相当于步骤S05)。接着,作为第二工序,将测定对象物(被检体9)配置测量区域5(相当于步骤S07)。此外,在第五实施例中,由于未将靶磁场设为零磁场而是设为规定的磁场,所以不进行对测量区域5施加消除计算出的原磁场 C 的偏置磁场 B_b 的处

理(步骤S06以及步骤S08)。

[0345] 接着,作为第三工序,使第一磁场产生器8X、第二磁场产生器8Y以及第三磁场产生器8Z产生作为欲形成于测量区域5的规定的磁场的靶磁场与原磁场C的差分的磁场(相当于步骤S08)。由此,能够对通过磁场产生器8(8X、8Y、8Z)施加的人工磁场A与原磁场C进行合成,对测量区域5作为靶磁场创建规定的磁场。此外,也可以更换第二工序和第三工序的顺序。

[0346] 而且,作为第四工序,在进行第三工序且第二工序结束期间,使用基于从磁传感器10输出的信号得到的测量值(平方差W-),来对测定对象物所产生的磁场B进行测定(相当于步骤S11)。由此,能够在将测量区域5设为规定的靶磁场的状态下,对测定对象物所产生的磁场B进行测定。

[0347] 对上述第一实施例~第四实施例,也能够通过产生作为欲形成于测量区域5的规定的磁场的靶磁场与原磁场C的差分的磁场,在测量区域5作为靶磁场创建规定的磁场。此外,在第五实施例中,若为了抵消从外部漏入测量区域5的原磁场C,将靶磁场设为零磁场,则能够准确地测量测定对象物所产生的磁场B(严格来说磁场的Z方向的成分)。

[0348] 第六实施例

[0349] 第六实施例是相对于第五实施例,在测量区域5作为靶磁场创建规定的三维矢量的磁场的情况的实施例。在第六实施例中,第一工序以及第二工序与第五实施例相同。

[0350] 作为第三工序,使第一磁场产生器8X产生将作为形成于测量区域5的规定的磁场的靶磁场与原磁场C(C_x 、 C_y 、 C_z)的差分的磁场的X方向的成分施加到X侧第一能级的恒定磁场恒定磁场,使第二磁场产生器8Y产生差分的磁场的Y方向的成分的磁场,使第三磁场产生器8Z产生差分的磁场的Z方向的成分的磁场(相当于步骤S08)。由此,能够对通过磁场产生器8(8X、8Y、8Z)施加的人工磁场A(A_x 、 A_y 、 A_z)与原磁场C(C_x 、 C_y 、 C_z)进行合成,在测量区域5作为靶磁场创建规定的三维矢量的磁场。此外,也可以更换第二工序与第三工序的顺序。

[0351] 而且,作为第四工序,在已经进行第三工序,第二工序结束期间使用基于从磁传感器10输出的信号得到的测量值(平方差W-)、第三交变磁场以及第四交变磁场,来对测定对象物所产生的磁场B(B_x 、 B_y 、 B_z)进行测定(相当于步骤S11)。由此,能够在将测量区域5设为规定的三维矢量的靶磁场的状态下,对测定对象物所产生的磁场B进行测定。

[0352] 对于上述第一实施例~第四实施例,也能够通过产生作为欲形成于测量区域5的规定的磁场的靶磁场与原磁场C(C_x 、 C_y 、 C_z)的差分的磁场的X、Y、Z方向的成分的磁场,在测量区域5作为靶磁场创建规定的磁场。此外,在第六实施例中,若为了抵消从外部漏入测量区域5的原磁场C(C_x 、 C_y 、 C_z),将靶磁场设为零磁场,则能够作为矢量准确地测量测定对象物所产生的磁场B。

[0353] 作用效果

[0354] 像这样,根据本实施方式的磁场测量装置1,能够通过向装入有碱金属原子等气体(气)的气室12单方向(Z轴方向)的照射光(探测光)的照射,来计算测量区域5的磁场矢量(C_x 、 C_y 、 C_z)。

[0355] 具体而言,分别对与照射光(探测光)的照射方向(Z轴方向)正交的X、Y轴方向,施加作为取n个固定值 f_i ($i=1、\dots、n$)的振幅 A_0 的时间函数 $f(t)$ 的磁场 A_x 、以及作为取m个固定值 g_j ($j=1、\dots、m$)的振幅 A_0 的时间函数 $g(t)$ 的磁场 A_y 。而且,获取人工磁场 A_x 、 A_y 和与基于从

磁传感器10输出的信号得到的测量值(平方差 W -)相当的自旋极化度 M_x 的组合,且是自旋极化度 M_x 不同的3个以上的组合。而且,使用上述组合、以及自旋极化度 M_x 和人工磁场 A_x 、 A_y ,根据公式17,计算磁场 C (C_x 、 C_y 、 C_z)。

[0356] 变形例

[0357] 此外,本发明的能够适用的实施方式并不限于上述实施例,当然能够在不脱离本发明的宗旨的范围内适当地变更。

[0358] (A) 偏置磁场 B_b

[0359] 在上述实施方式中,使磁场产生器8产生消除原磁场 C 的偏置磁场 B_b ,来测定测定对象物所产生的磁场 B (B_x 、 B_y 、 B_z),但也可以不产生偏置磁场 B_b 来进行测定。具体而言,首先与上述实施方式相同,预先,在没有测定对象物的状态下测量原磁场 C_x 。然后,使测定对象物接近磁传感器10来测量该测定对象物所产生的磁场,但此时,使磁场产生器8产生人工磁场 A 。在该情况下,对测量区域5施加的磁场为原磁场 C 、测定对象物的磁场 B 、以及磁场产生器8的人工磁场 A 的合成磁场。因此,此时使用公式17计算出的磁场 C_x 减去预先测定出的原磁场 C_x 所得的磁场为测定对象物所产生的磁场 B 。

[0360] (B) 测定对象物

[0361] 另外,在上述实施方式中,将测定对象物设为人体,测量了来自心脏的磁场(心磁)、来自脑的磁场(脑磁),但测定对象物也可以是人体以外。而且,根据测定对象物,也能够不用像上述实施方式那样使测定对象物接近磁传感器10,而是使磁传感器10接近测定对象物,来测量该测定对象物所产生的磁场。

[0362] 符号说明

[0363] 1…磁场测量装置;5…测量区域;8…磁场产生器;8X…第一磁场产生器(亥姆霍兹线圈);8Y…第二磁场产生器(亥姆霍兹线圈);8Z…第三磁场产生器(亥姆霍兹线圈);9…被检体(测定对象物);10…磁传感器;12…气室(介质);14、15…光检测器;18…光源;30…运算控制部。

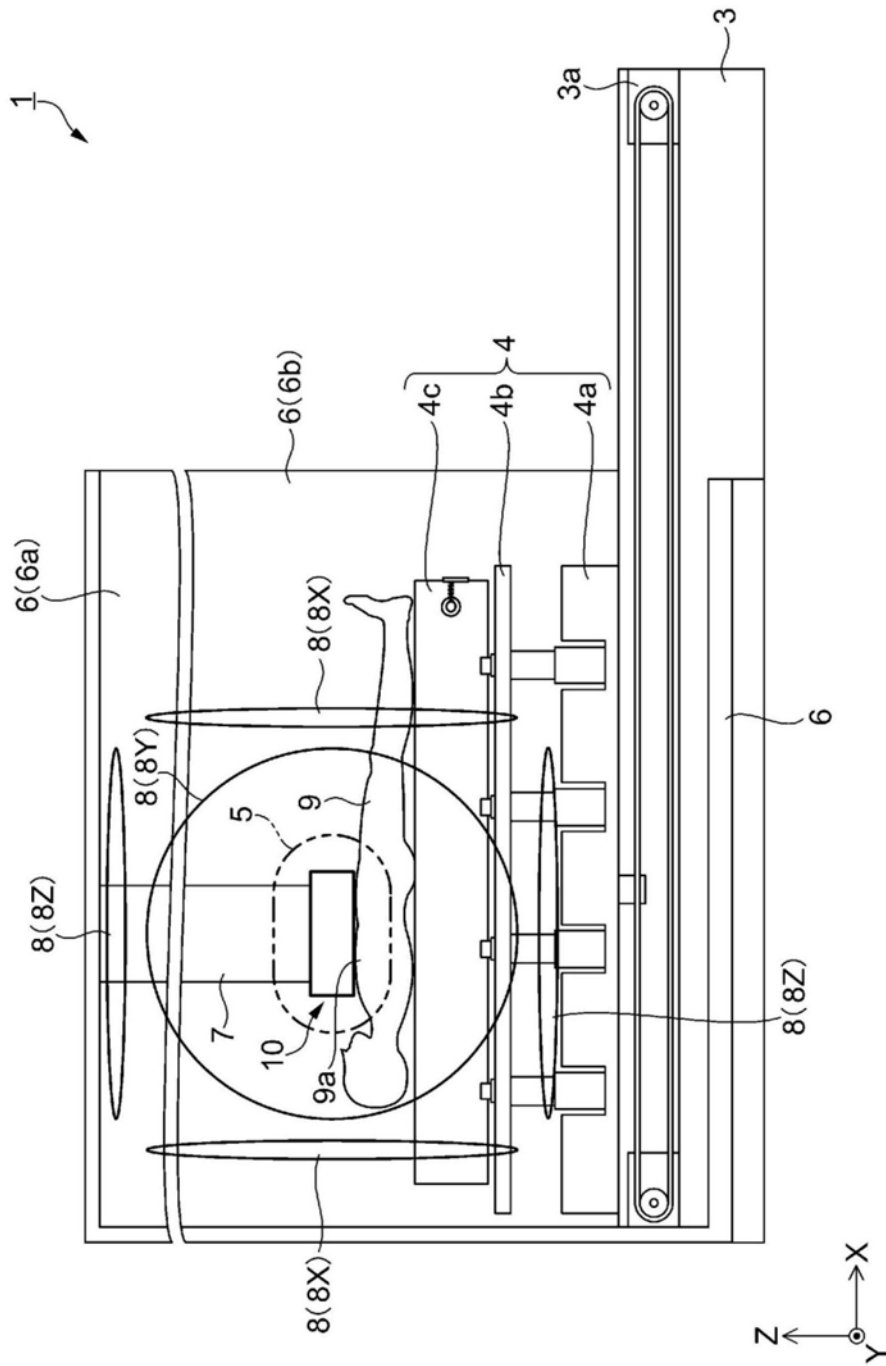


图1

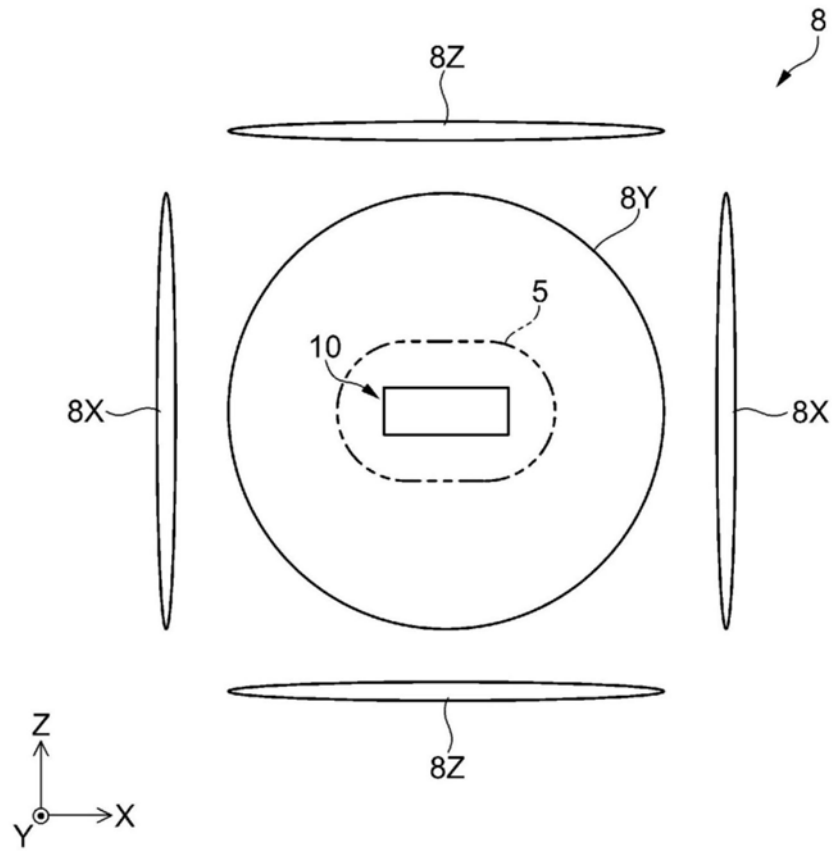


图2

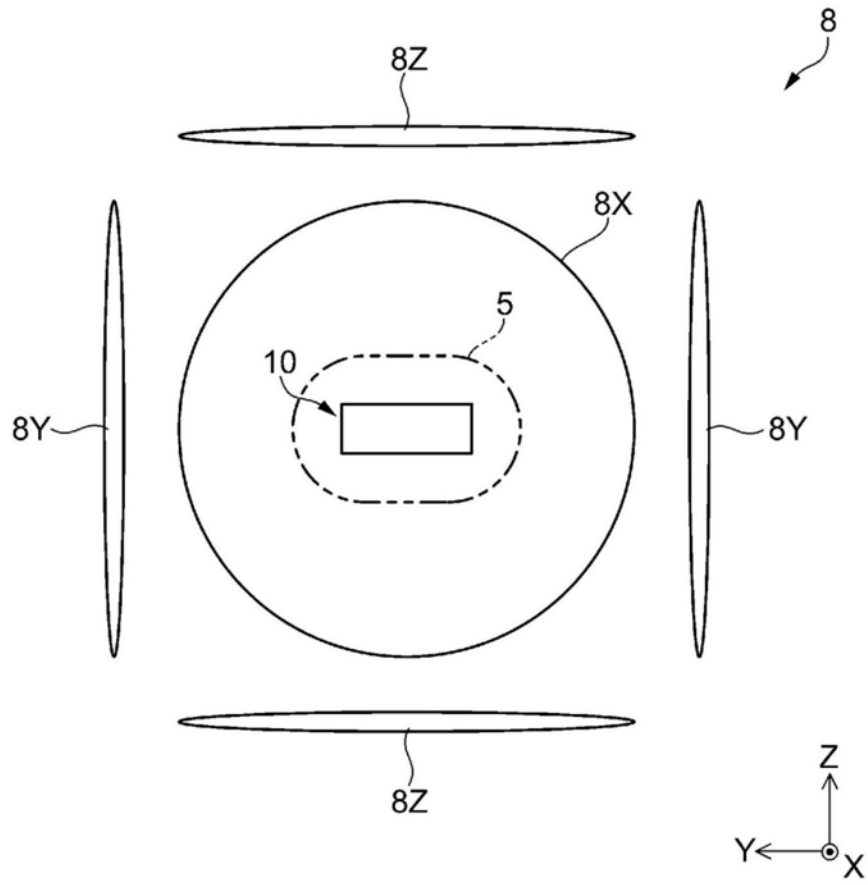


图3

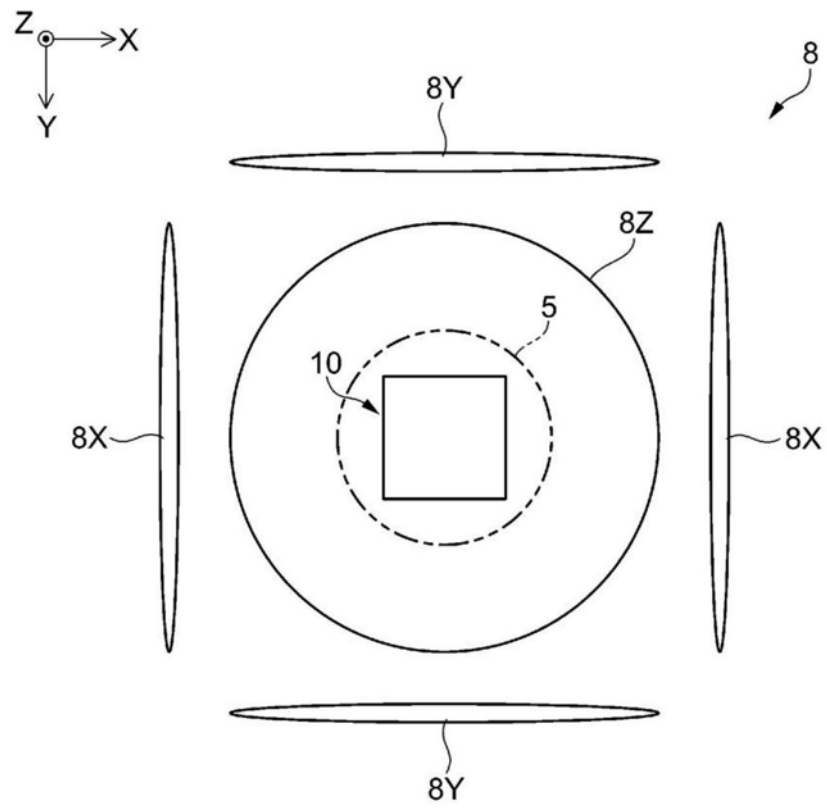


图4

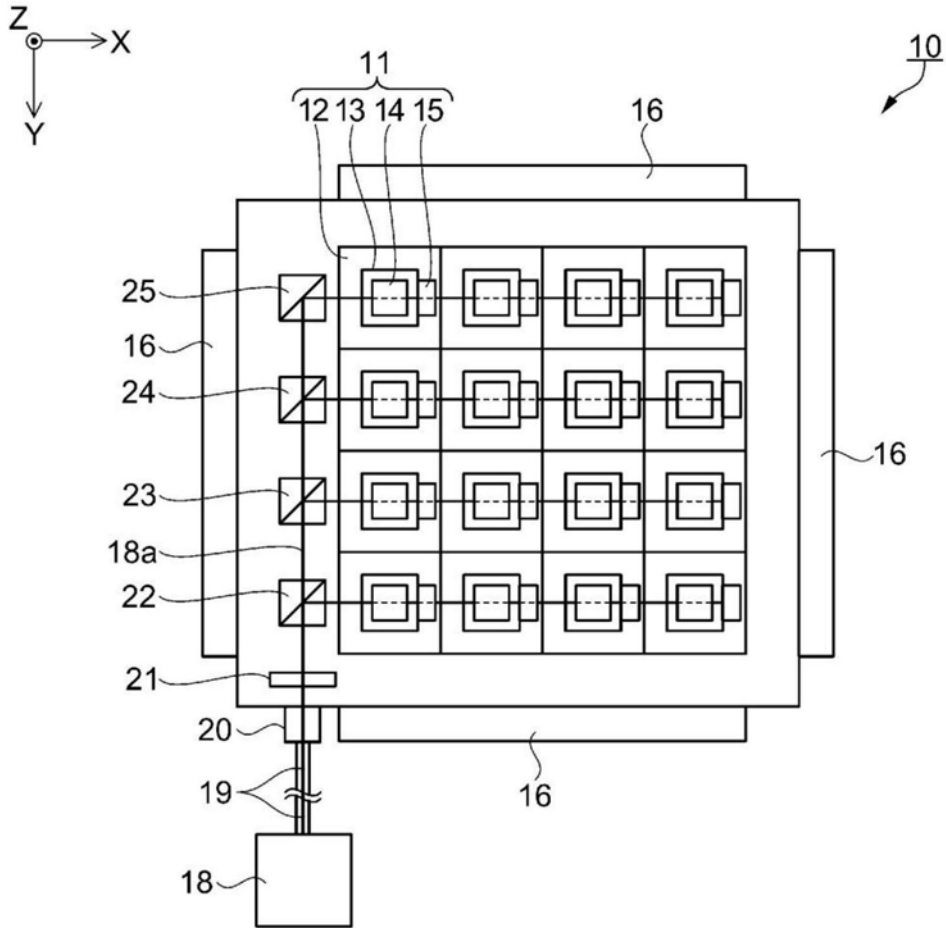


图5

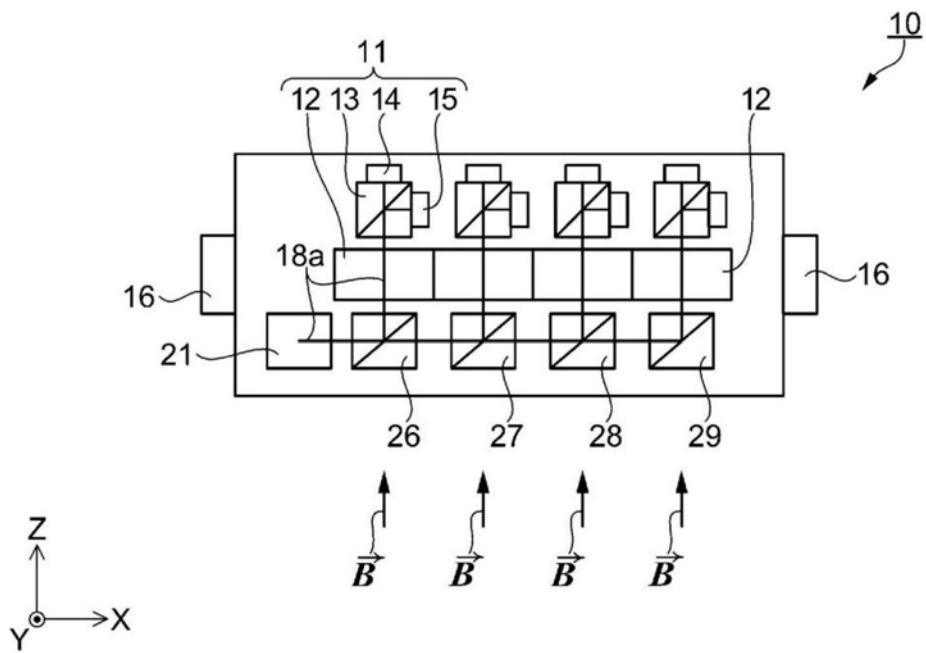


图6

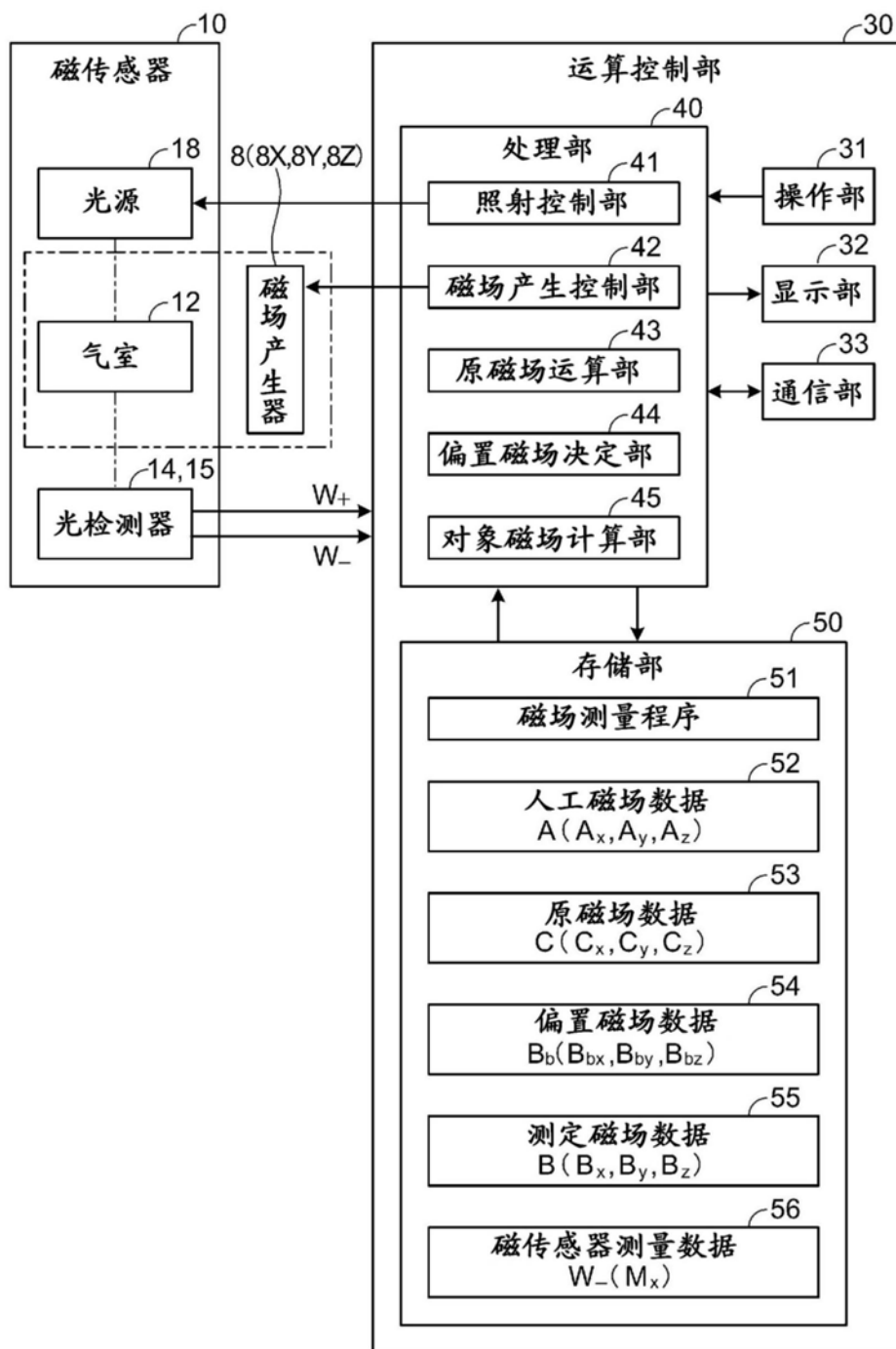


图7

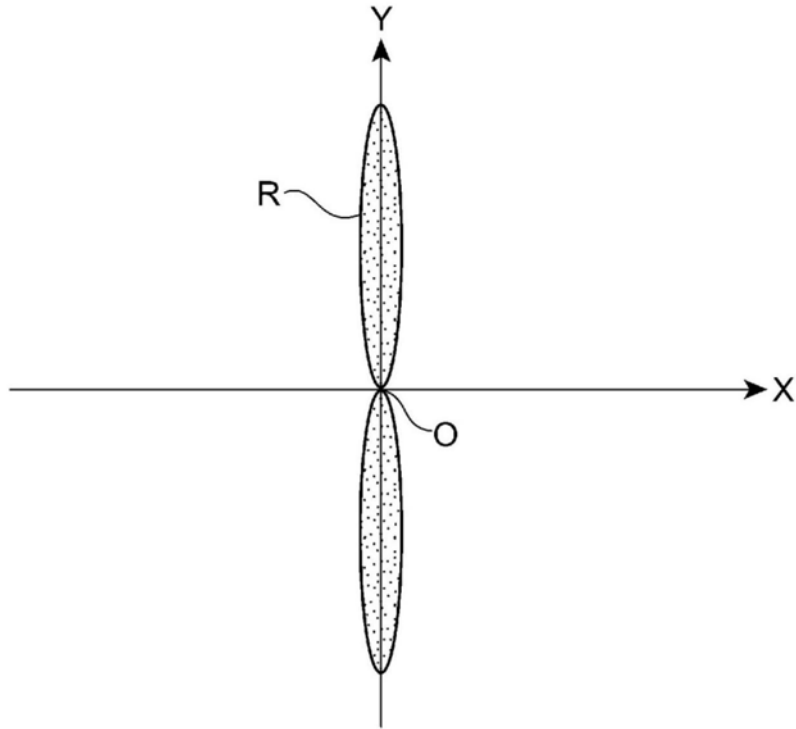


图8

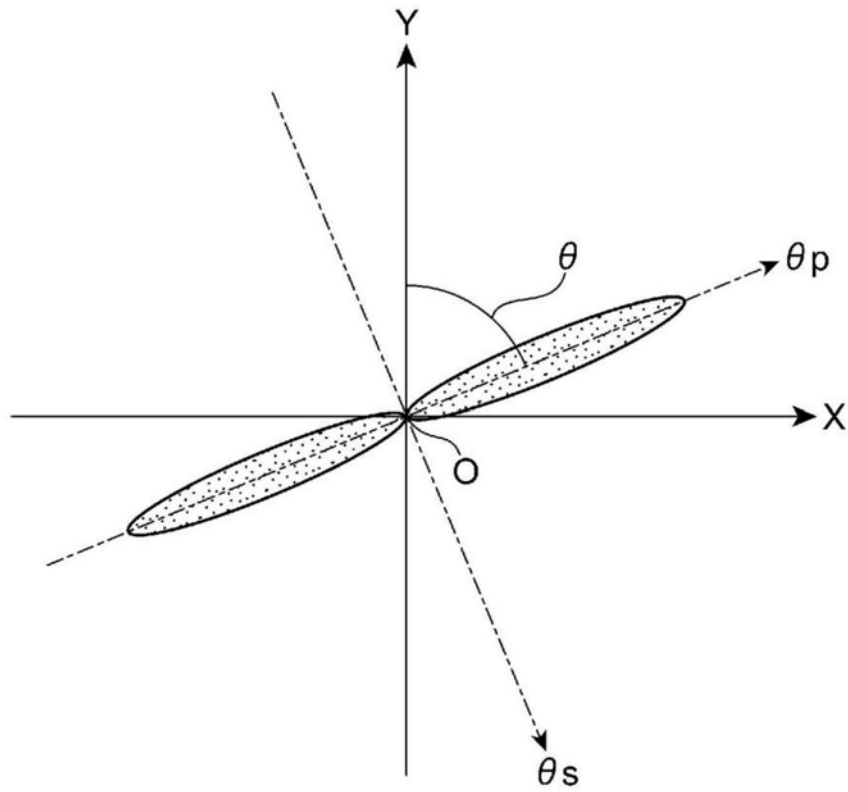


图9

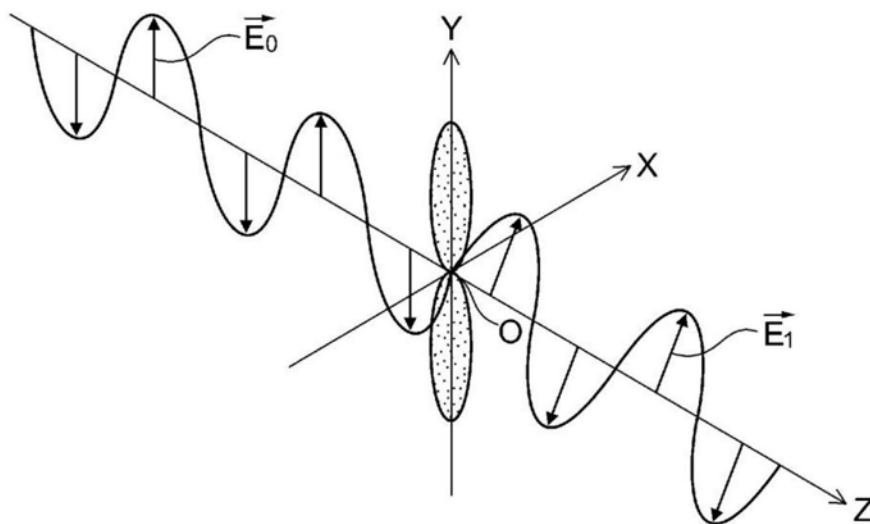


图10

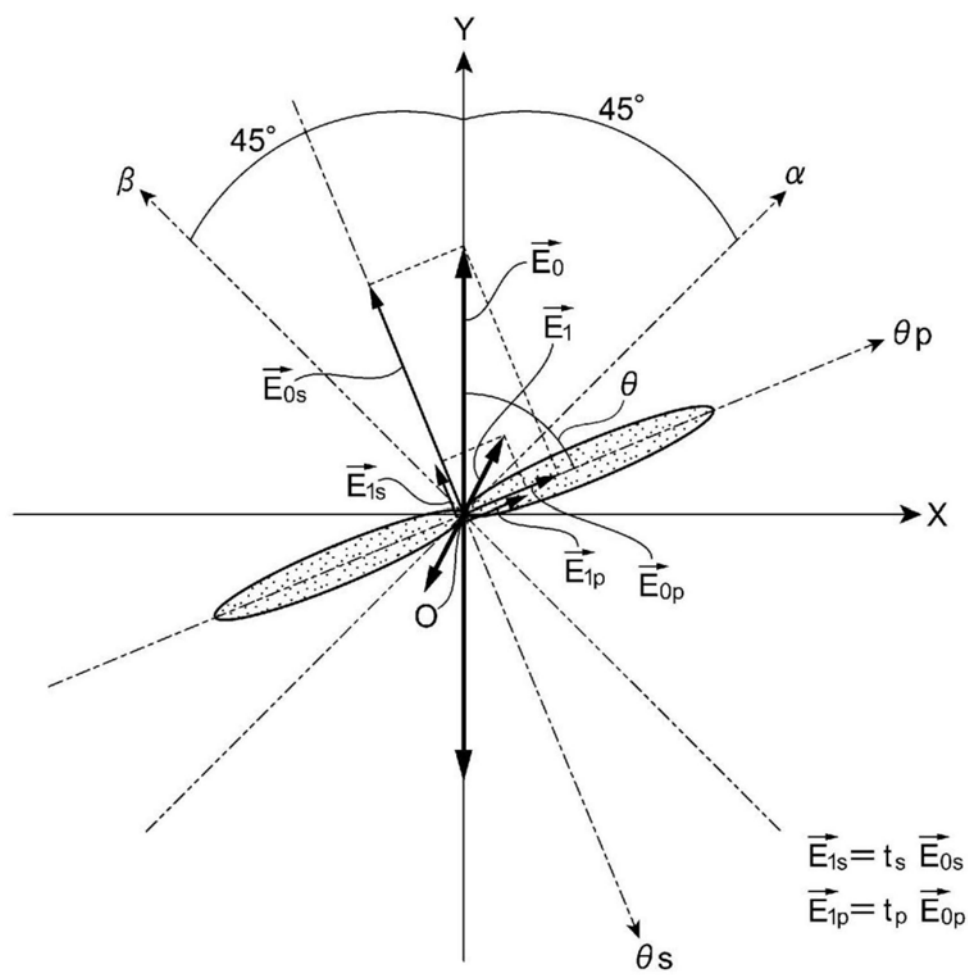


图11

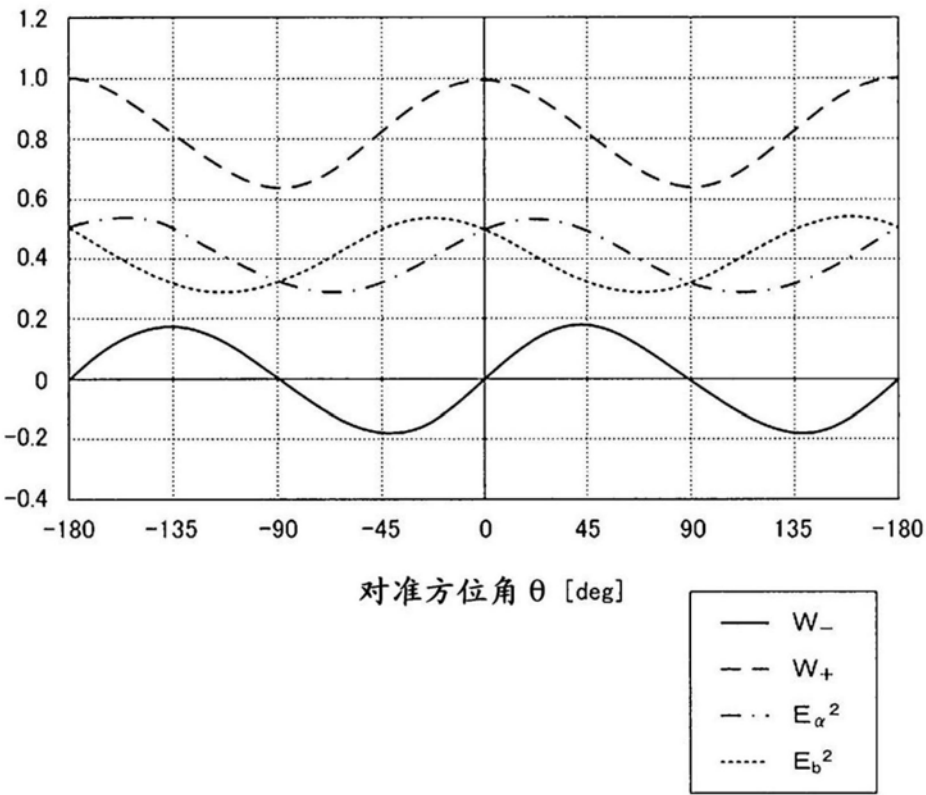


图12

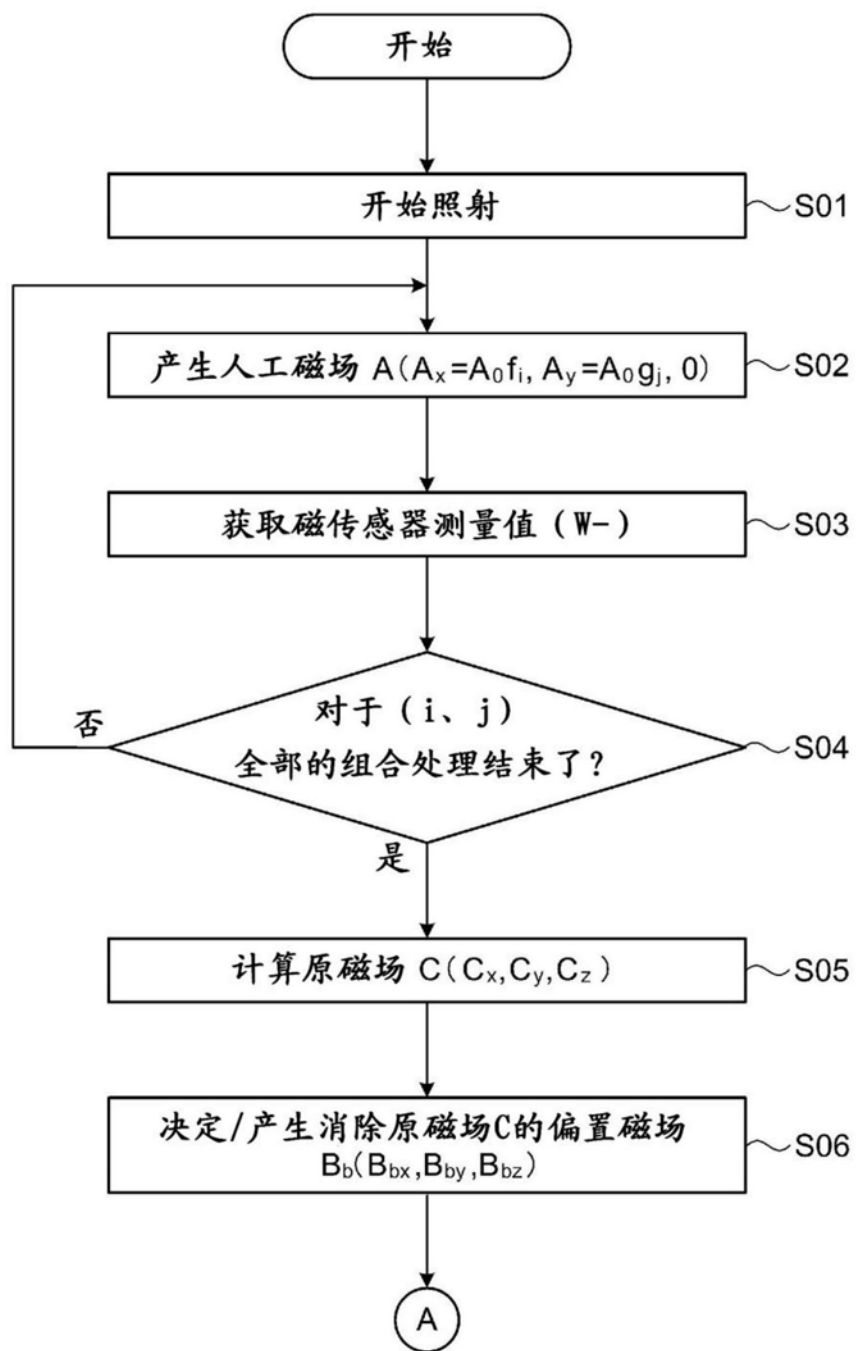


图13

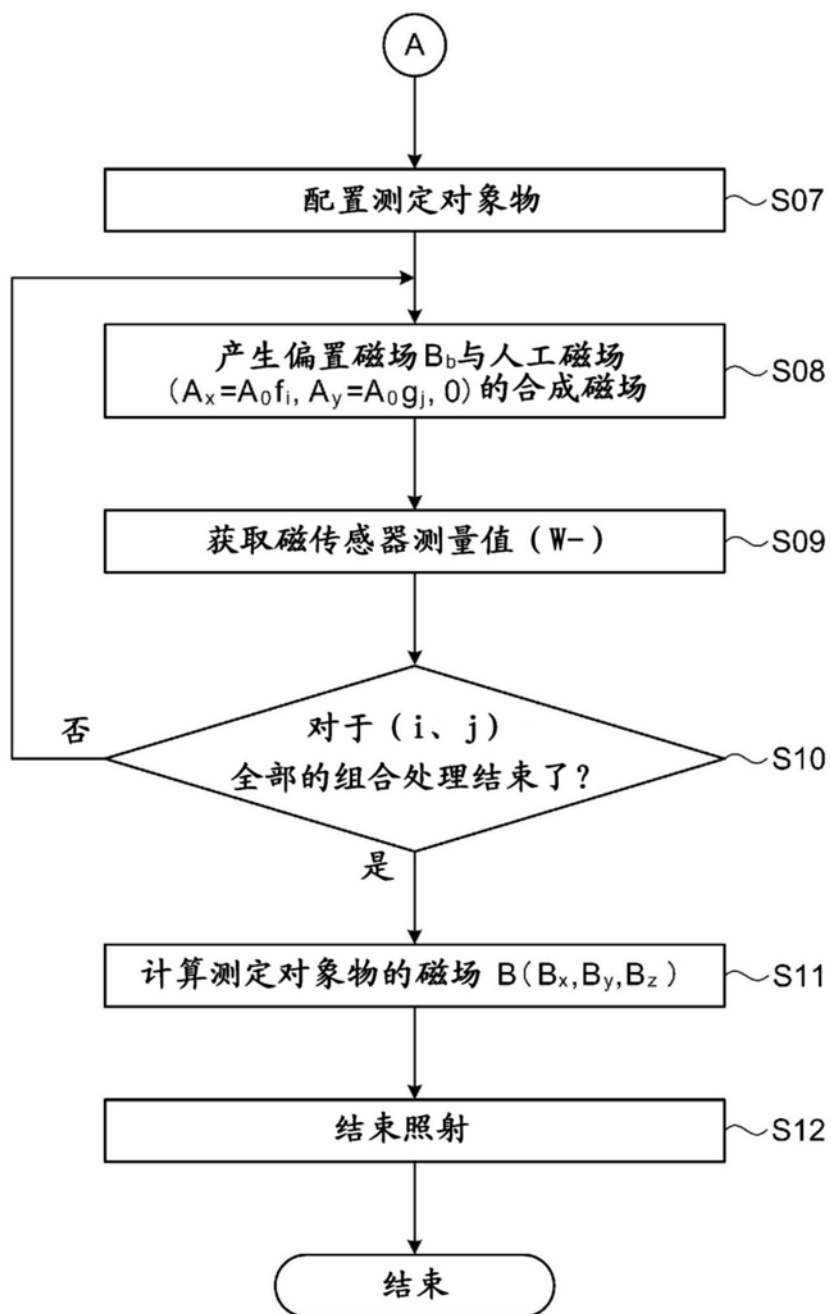


图14

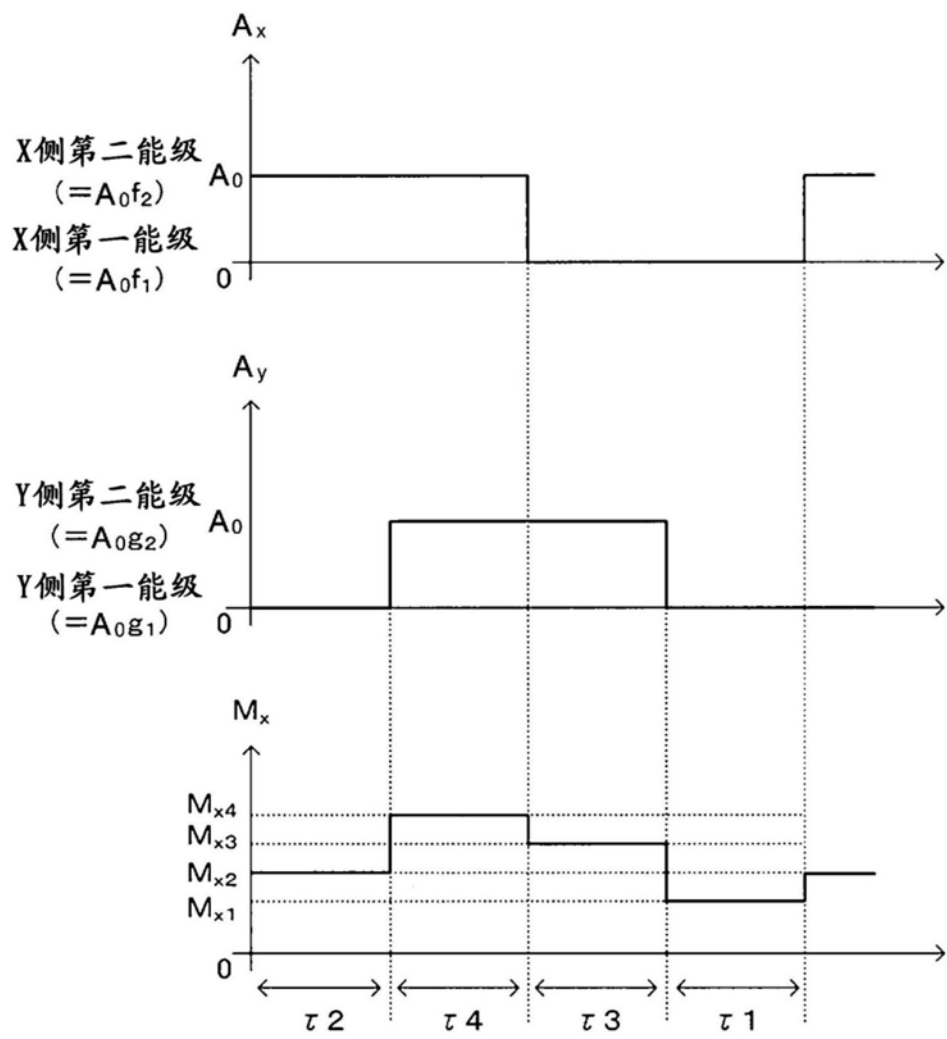


图15

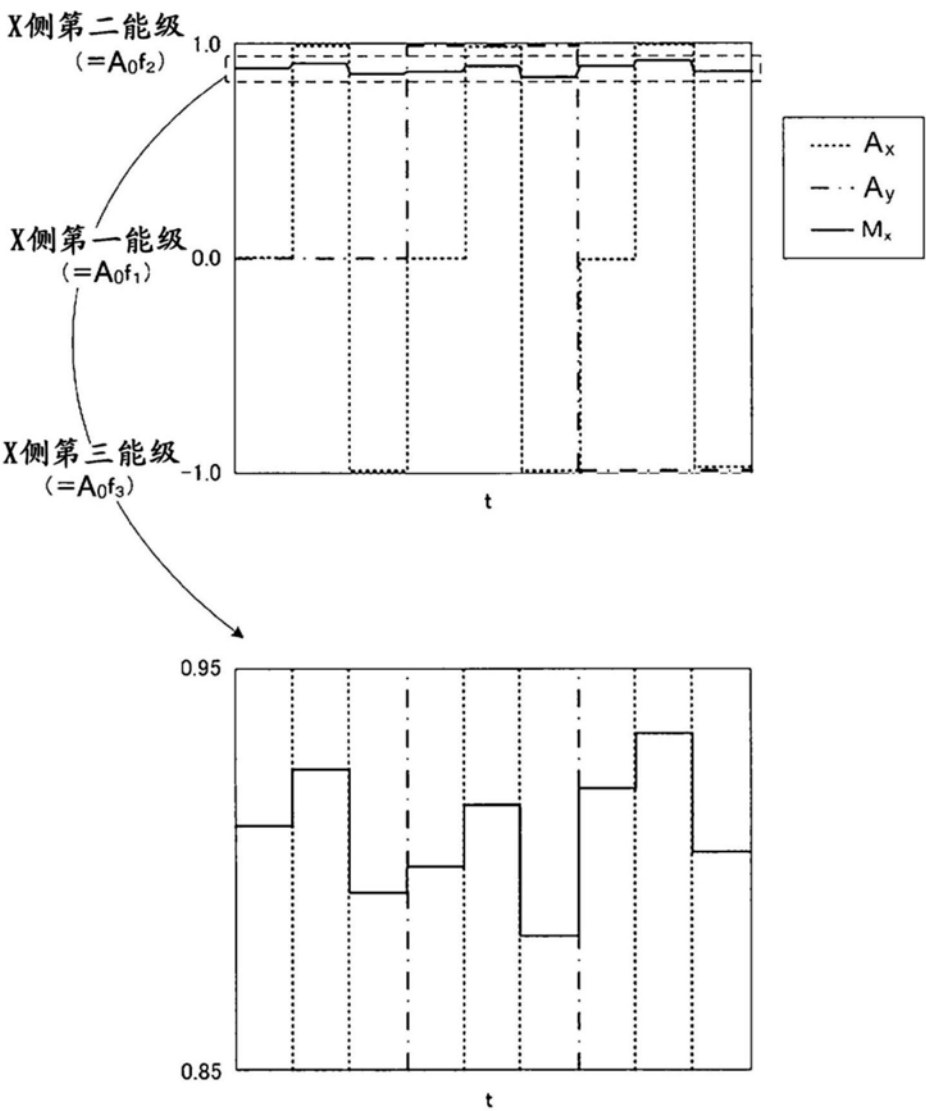


图16